

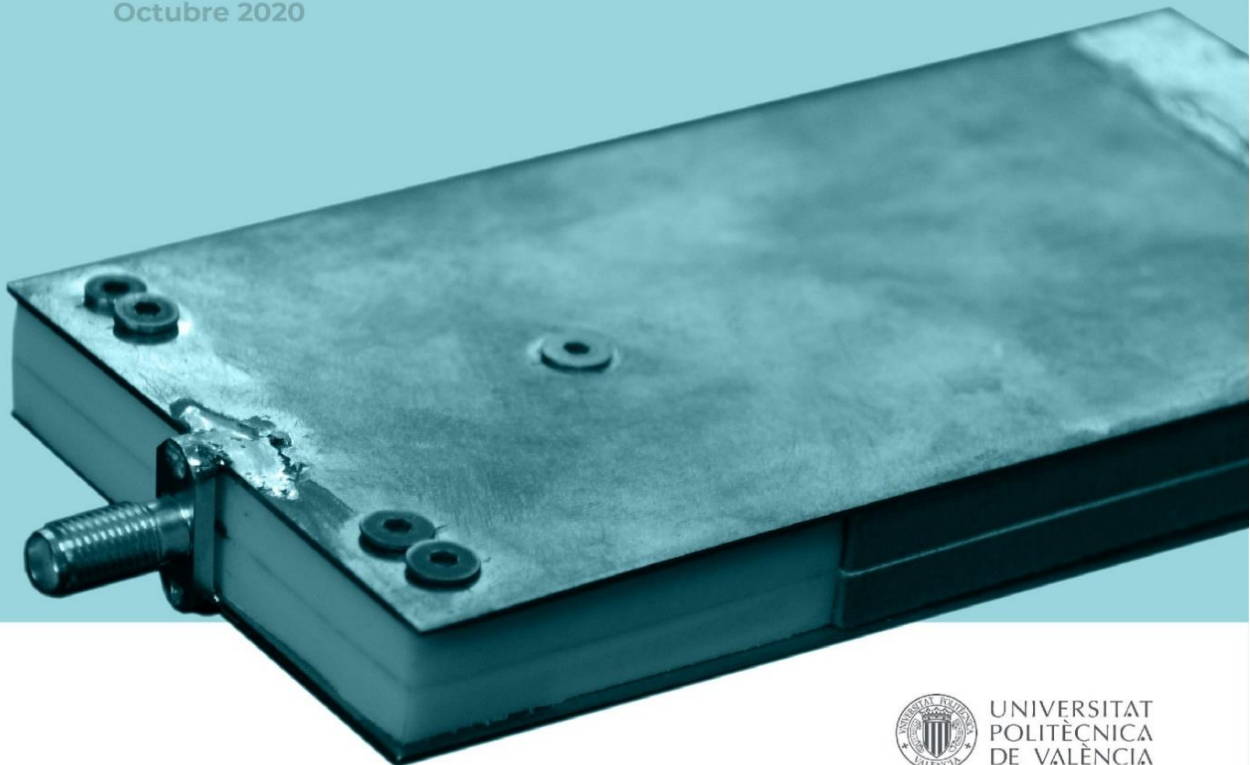
TESIS DOCTORAL

**IMPLEMENTACIÓN DE CÉLULAS CALEFACTORAS
ALIMENTADAS POR MICROONDAS PARA MEJORA
ENERGÉTICA Y ELIMINACIÓN DE COMBUSTIBLES
FÓSILES EN PROCESOS DE CALENTAMIENTO DE
FLUIDOS ALIMENTARIOS**

Presentada por:
Diego Alcañiz Cosín

Dirigida por:
Dra. Ruth De los Reyes Cánovas
Dra. María Dolores Ortolá Ortolá

Octubre 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS PARA EL
DESARROLLO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Implementación de células calefactoras alimentadas por
microondas para mejora energética y eliminación de
combustibles fósiles en procesos de calentamiento de
fluidos alimentarios

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Diego Alcañiz Cosín

Dirigida por:
Dra. Ruth De los Reyes Cánovas
Dra. Maria Dolores Ortolá Ortolá

Octubre 2020



Dra. M^a Dolores Ortolá, Catedrática de Universidad perteneciente al Departamento de Tecnología de Alimentos y

Dra. Ruth De los Reyes, Doctora en Tecnología de alimentos y CEO de Microbiotech

CONSIDERAN: que la memoria titulada “Implementación de células calefactoras alimentadas por microondas para mejora energética y eliminación de combustibles fósiles en procesos de calentamiento de fluidos alimentarios” que presenta D. Diego Alcañiz Cosín, para aspirar al grado de Doctor de La Universitat Politècnica de València, y que ha sido realizada bajo su dirección en la empresa Microbiotech S.L. junto con el Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo de la Universitat Politècnica de València, reúne las condiciones adecuadas para constituir su tesis doctoral, por lo que AUTORIZAN al interesado para su presentación.

Valencia, octubre 2020

Fdo: Ruth De los Reyes

Fdo: M^a Dolores Ortolá

AGRADECIMIENTOS

A mi familia. A mi madre que estará más orgullosa de este trabajo que yo mismo. Gracias por ayudarme a seguir en esto cuando dudaba si valía la pena o no. A mi padre por darme siempre su punto de vista tranquilo y sabio, orientarme en momentos en los que no sabía que hacer. A Erika por habérmelo puesto muy fácil en momentos difíciles y haber sido siempre comprensiva.

Al equipo, Nico, Raúl, Marcos, Valentín y Miguel, por estar siempre cerca aunque ahora mismo vivan lejos. A muchos otros amigos y amigas que han hecho que estos años hayan sido tan buenos, Quique, Raquel, Javi, Fani...

A kajukenbo Valencia, y especialmente a Jaime y Yoli, porque los pensamientos están mucho más claros después de hora y media de artes marciales.

A Paula, por la portada, y a Alba, por la ayuda con las traducciones.

A mis compañeras del laboratorio 1.5, Sara, Mariola y Aitana. Por hacer piña, contagiarme la pasión por la investigación, y nunca dejar de aprender.

A los amigos del resto de la planta: Ever, Andrea, Quim, Susana, Leidy, Juan, Ramon... Todo es más fácil con gente así.

A los que me han acompañado en Microbiotech: Pablo, Rubén, y Gonzalo, sin olvidar a los "jefes" Enrique y Juan Eduardo.

Andrea por lo bien que trabajamos juntos el tiempo que estuvo y porque el capítulo 2 no lo habría podido completar sin toda su ayuda.

Habéis sido para mi el dream team, el equipo con el que me encanta trabajar.

Mención a parte merece Elías, creo que la persona que conozco con más trayectoria en la Ciencia, y siempre has tenido un trato cercano, has sido un mentor y un amigo.

To Gianpaolo because working with you made me learn so much, but there is something else. In the most difficult situation Europe has lived in this century, I was far from home, but you give me support and helped me to feel like home. I absolutely think that going to Unibas was the best possible decision, I wouldn't change it for going to any other more famous and prestigious place, not even Gothenburg.

Sarò sempre grato anche al resto delle persone con cui ho condiviso quei 4 mesi insoliti nella città di Potenza. Laura per il suo aiuto con il linguaggio. Germán, Lola e Marta per le avventure durante la reclusione e gli aperitivi quando eravamo liberi. Valeria per tutte le stesse cose che ho detto di Gianpaolo.

Al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) por haber confiado en este proyecto desde su inicio en 2016 y haberle dado apoyo económico.

A mis tutoras por haberme guiado en este trabajo, siempre permitiendo que lleve mi seña de identidad.

Ruth es, con mucho, la persona que más me ha enseñado en lo que llevo de carrera profesional. Entré en Microbiotech en 2015 y 5 años después soy otra persona totalmente distinta. Confiaste en mi para

este proyecto cuando yo pensaba que sólo los cracks hacían doctorados.

A Loles por su visión calmada, por su experiencia y por la paciencia que ha tenido a la hora de enseñarme y guiarme en este proceso.

Gracias a todos los que habéis estado a mi lado en esta
aventura

ABSTRACT

Thermal treatments have a great impact in the agri-food industry, being the origin of up to 80% of the CO₂ emissions generated by this sector in some regions. For this reason, there is great interest in new technologies applied to thermal processes that can be powered by electricity, since it can come from renewable energy sources and therefore be neutral in emissions. In this context, the company Microbiotech S.L. has developed the Basic Cell of Energy Transference (BCET) technology, which consists of conducting microwave energy through a coaxial cable, very efficiently, to the material to be heated. This material is a ceramic, modified to absorb microwave energy, increasing its temperature rapidly, but maintaining the slow release of heat typical of ceramic materials. The objective of the thesis was to increase the state of development of this technology in its application to heat fluids, and to characterize it more in depth. The first step of the research focused on finding the most suitable material for this technology, with the premise of rapidly raising its temperature, and releasing the absorbed heat slowly. A ceramic formulation with 50% SiC was chosen as a susceptor. Its application as an air heater was validated, offering 40% savings compared to conventional ones. Then, after three cycles of trial and error, a prototype fluid heater was built using CBTE technology capable of reaching pasteurization temperatures, operating for a long time and offering an energy efficiency of 45%. Third, by means of multiphysics simulation, various variables of the prototype were simulated. In the simulations, an overheating problem was found because, due to the flow pattern of the fluid, part of it remained in contact with the plate for longer, which was solved by means of metal sheets that guided the passage of the fluid. Finally, the entropy generated by the system was analysed, examining the influence of different parameters, concluding that the main variable is the fluid to be heated. In conclusion, it has been possible to obtain a prototype of BCET technology to heat fluids, the steps to improve it in future iterations thanks to multiphysics simulations are known, and the influence of the different variables in the generation of entropy has been analysed.

RESUMEN

Los tratamientos térmicos tienen un gran peso en la industria agroalimentaria, siendo el origen de hasta el 80% de las emisiones de CO₂ generadas por este sector en algunas regiones. Por esta razón, existe un gran interés en nuevas tecnologías aplicadas a procesos térmicos que puedan alimentarse por electricidad, ya que puede provenir de fuentes de energía renovable y, por tanto, ser neutras en emisiones. En este contexto, la empresa Microbiotech S.L. ha desarrollado la tecnología de Célula Básica de Transferencia de Energía (CBTE), la cual consiste en conducir energía de microondas por un cable coaxial, de forma muy eficiente, hasta el material a calentar, y este tiene las dimensiones óptimas para absorber toda la energía y calentarse de forma homogénea. Este material es un tipo de cerámica, modificada para que absorba la energía de microondas, incrementando su temperatura rápidamente, pero manteniendo la liberación de calor lenta típica de materiales cerámicos. El objetivo de la tesis fue incrementar el estado de desarrollo de esta tecnología en su aplicación para calentar fluidos, caracterizarla más en profundidad y verificar su viabilidad para pasteurización de alimentos líquidos, independientemente de su capacidad para absorber microondas. El primer paso de la investigación se centró en hallar el material más adecuado para esta tecnología, con la premisa de elevar rápido su temperatura, y liberar el calor absorbido lentamente. Se escogió una formulación cerámica con un 50% de SiC como suscepter. Se validó su aplicación como calefactor de aire ofreciendo un 40% de ahorro en comparación con los convencionales. A continuación, tras tres ciclos de ensayo y error, se construyó un prototipo de calentador de fluidos por tecnología CBTE capaz de alcanzar temperaturas de pasteurización, funcionar de forma prolongada y ofreciendo una eficiencia energética del 45%. En tercer lugar, por medio de simulación multifísica, se simuló diversas variables del prototipo. En las simulaciones se encontró un problema de sobrecalentamiento porque, debido al patrón de circulación del fluido, parte de este permanecía más tiempo en contacto con la placa, lo cual se solucionó mediante láminas metálicas que guiaban el paso del fluido. Por

último, se analizó la entropía generada por el sistema, examinando la influencia de distintos parámetros, concluyendo que la principal variable afecta al fluido a calentar. En conclusión, se ha conseguido obtener un prototipo de tecnología CBTE para calentar fluidos a temperaturas de pasteurización, se conocen los pasos para mejorarlo en futuras iteraciones gracias a las simulaciones multifísicas, y se conoce la influencia de las distintas variables en la generación de entropía.

RESUM

Els tractaments tèrmics tenen una gran importància en la indústria agroalimentària, sent l'origen de fins al 80% de les emissions de CO₂ generades per aquest sector en algunes regions. Per aquesta raó, hi ha un gran interès en noves tecnologies aplicades a processos tèrmics que puguin alimentar-se per electricitat, ja que pot provenir de fonts d'energia renovable i per tant, ser neutres en emissions. En aquest context, l'empresa Microbiotech S.L. ha desenvolupat la tecnologia de Cèl·lula Bàsica de Transferència d'Energia (CBTE), la qual consisteix en conduir energia de microones per un cable coaxial, de forma molt eficient, fins al material a escalfar. Aquest material és un tipus de ceràmica, modificada perquè absorbeixi l'energia de microones, incrementant la seua temperatura ràpidament, però mantenint l'alliberament de calor lenta típica de materials ceràmics. L'objectiu de la tesi va ser incrementar l'estat de desenvolupament d'aquesta tecnologia en la seua aplicació per escalfar fluids, i caracteritzar-la més en profunditat. El primer pas de la investigació es va centrar en trobar el material més adequat per a aquesta tecnologia, amb la premissa d'eleva ràpid la seua temperatura, i alliberar la calor absorbida lentament. Es va escollir una formulació ceràmica amb un 50% de SiC com susceptor. Es va validar la seua aplicació com calefactor d'aire oferint un 40% d'estalvi en comparació amb els convencionals. A continuació, després de tres cicles d'assaig i error, es va construir un prototip d'escalfador de fluids per tecnologia CBTE capaç d'assolir temperatures de pasteurització, funcionar de forma prolongada i oferint una eficiència energètica del 45%. En tercer lloc,

per mitjà de simulació multifísica, es van simular diverses variables del prototip. En les simulacions es va trobar un problema de sobreescalfament perquè, a causa del patró de circulació del fluid, part d'aquest roman més temps en contacte amb la placa, la qual cosa es va solucionar mitjançant làmines metàl·liques que guiaven el pas del fluid. Finalment, es va analitzar l'entropia generada pel sistema, examinant la influència de diferents paràmetres, conclouent que la principal variable es el fluid a escalfar. En conclusió, s'ha aconseguit obtenir un prototip de tecnologia CBTE per escalfar fluids, es coneixen els passos per millorar-lo en futures iteracions gràcies a les simulacions multifísicas, i es coneix la influència de les diferents variables en la generació d'entropia.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
	1.1 <i>Industria agroalimentaria</i>	3
	1.2 <i>Problema energético y de cambio climático</i>	4
	1.3 <i>Procesos de calentamiento en la industria agroalimentaria</i>	6
	1.4 <i>Intercambiadores de calor</i>	9
	1.5 <i>Nuevas tecnologías en la industria agroalimentaria</i>	13
	1.6 <i>Célula Básica de Transferencia de Energía</i>	25
	1.7 <i>Simulación multifísica y optimización</i>	27
	1.8 <i>Bibliografía</i>	29
2	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	37
3	RESULTADOS	41
	CAPÍTULO 1:	43
	<i>INTRODUCTION</i>	45
	<i>MATERIALES Y EXPERIMENTAL</i>	48
	<i>RESULTADOS</i>	54
	<i>CONCLUSIONES</i>	72
	CAPÍTULO 2:	75
	<i>INTRODUCTION</i>	77
	<i>MATERIALES Y EXPERIMENTAL</i>	80
	<i>RESULTADOS</i>	86
	<i>CONCLUSIONES</i>	100
	CHAPTER 3:.....	104
	<i>INTRODUCTION</i>	106
	<i>PROBLEM FORMULATION</i>	109
	<i>RESULTS AND DISCUSSION</i>	115
	<i>CONCLUSIONS</i>	121
	<i>NOMENCLATURE</i>	122
	<i>BIBLIOGRAPHY</i>	124
	CHAPTER 4:.....	126
	<i>INTRODUCTION</i>	128
	<i>PROBLEM FORMULATION</i>	131
	<i>RESULTS AND DISCUSSION</i>	134
	<i>CONCLUSIONS</i>	139
	<i>BIBLIOGRAPHY</i>	140
4.	CONCLUSIONES	143

5. PERSPECTIVAS FUTURAS	147
ANEXOS	151
SOLICITUD H2020 SME INSTRUMENT	153
SELLO DE EXCELENCIA	164

LISTA DE FIGURAS

Introducción

Figura 0.1. Espectro electromagnético (Gupta & Leong, 2008).....	17
Figura 0.2 Diferentes mecanismos de polarización de las microondas (Gupta & Leong (b), 2008).....	19
Figura 0.3 horno industrial de microondas (Sairem SAS (b) 2020)	24
Figura 0.4 tunel de microondas (Sairem SAS (b) 2020).....	25

Capítulo 1

Figura 1.1. Horno microondas con cámara termográfica acoplada...	51
Figura 1.2. Calefactor cerámico con resistencia eléctrica	51
Figura 1.3 Diagrama del calefactor basado en microondas	52
Figura 1.4: ejemplo de una probeta válida (arriba), y de una fallida (abajo)	55
Figura 1.5 Ejemplo de la evolución de temperatura de la probeta 40 en sus tres repeticiones	57
Figura 1.6 Secuencia de calentamiento MBT01	59
Figura 1.7 Secuencia de calentamiento MBT02.....	60
Figura 1.8 Evolución de la temperatura vs tiempo en las pruebas de calentamiento por microondas.....	61
Figura 1.9 Evolución de la velocidad de calentamiento frente al tiempo	62
Figura 1.10 evolución de la temperatura con el tiempo de placas cerámicas MBT01 y MBT02.	63
Figura 1.11 evolución de la velocidad de enfriamiento con el tiempo de placas cerámicas MBT01 y MBT02	64
Figura 1.12 Célula básica de transferencia de energía. (a) cerámicas usadas para una célula (b) disposición de tira de conductor en cada célula (c) apariencia final de una célula	66
Figura 1.13 (a) interior y apariencia del divisor de potencia (b) montaje de 4 células alimentadas por el divisor de potencia.....	67

Capítulo 2

Figura 2.1 Elementos comunes en todas las fases del calentador de fluidos por tecnología CBTE.	82
Figura 2.2. Interfaz del software LeanOn.....	83
Figura 2.3 Primer diseño del cuerpo del calentador de fluidos con tecnología CBTE.....	87
Figura 2.4 Segundo diseño (a) y construcción (b) del calentador de fluidos basado en tecnología CBTE	88
Figura 2.5 tercer diseño (a) y construcción (b) del calentador de fluidos basado en tecnología CBTE	90
Figura 2.6 Ejemplo de pruebas preliminares (diseño de prototipo 3). Calentamiento de 2 L/min con 200 W	91
Figura 2.7 Proceso típico de calentamiento de agua con un calentador de fluidos por tecnología CBTE	92
Figura 2.8 calentamiento de disoluciones con concentraciones crecientes de (a) sacarosa (b) NaCl	94
Figura 2.9 Calentamiento de aceite mediante el calentador de fluidos por CBTE.....	96

Chapter 3

Figure 3.1 Configuration of the BCET prototype: two flow boxes (including their pipe connections) interspersed by the active plate.	109
Figure 3.2 modified single flow box A	113
Figure 3.3 single pass temperature increase (ΔT) charts for the employed fluids (a) water and milk, (b) sunflower oil, depending on the power applied to the active plate q_A for variable inlet velocity: 0.331m/s; diamond: 0.662 m/s; circle 1.324 m/s.	116
Figure 3.4 Qualitative fluid temperatura distribution adjacent to the active plate for the single flow box of figure 2 with $L=24.2$ cm, when $q_A=200$ W and $v_i=0.662$ m/s (Base case). Left: water, Center: sunflower oil, Right: milk.....	117
Figure 3.5 dimensionless temperatures θ_{max} and θ_{min} at the active plate (left axis), and head loss Δp [Pa] (right axis), as dependent of the lenght B [cm], for the Base Case and water.....	118

Figure 3.6 temperature excess for water and the Base Case, with no baffles, with its scale at right..... 119

Figure 3.7 Temperature excess for water and the Base case, with two 1cm baffles (left), two 5cm baffles (center) and two 7cm baffles (right). The temperatura scale is provided at right. 120

Chapter 4

Figure 4.1 Entropy generation associated to heat transport in (a) water; (b) sunflower oil..... 136

Figure 4.2 Entropy generation vs baffle length for (a) heat transfer component (b) fluid flow component..... 138

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Características de las composiciones analizadas (densidad aparente (kg/m^3)), capacidad de absorber agua (%), t (s) en alcanzar 300°C (t_{300}), t enfriarse (s) hasta 100°C (t_{100}) y coeficiente α) en función del % de susceptor y T de sinterización ($^\circ\text{C}$)	56
Tabla 1-2 Comparación del consumo de energía del calefactor eléctrico y del CBTE	70

CAPÍTULO 2

Tabla 2-1: propiedades de las disoluciones de ensayos de calentamiento	83
Tabla 2-2 Velocidades de calentamiento de las disoluciones en el calentador de fluidos CBTE	95

CAPÍTULO 3

Tabla 3-1: Grid independency test	112
---	-----

CAPITULO 4

Tabla 4-1 entropy components generated in the analyzed conditions	135
---	-----

1.INTRODUCCIÓN

Introducción

1.1 Industria agroalimentaria

En la Unión Europea, la industria alimentaria es la principal actividad de la industria manufacturera. Presenta un valor superior a los 1.109.000 millones de euros de cifra de negocios, superando en un 1% la cifra del año anterior y representando el 13,8% del consumo, según el informe de la Confederación Europea de Industria agroalimentarias (2018). Cuenta con 294.000 empresas que dan empleo a 4,57 millones de personas y donde las pequeñas y medianas empresas representan el 48,1% del total de cifra de negocios del sector alimentario y el 61,3% del conjunto de los puestos de trabajo que genera. El 95,3% de dichas empresas son Pymes con menos de 50 empleados, y un 79,6% tienen menos de 10 trabajadores. En conjunto, 9 de cada 10 empresas son PYMES (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2018).

La industria alimentaria española ocupa el quinto puesto de la Unión Europea en cifra de negocios con un 8,7% del total europeo, por detrás de Francia (16,2%), Alemania (15,4%), Italia (12,0%) y Reino Unido (10,7%).

En España, la industria de alimentación y bebidas es la primera rama del sector industrial, según la última Estadística Estructural de Empresas del INE (año 2019), con 113.593,07 M€ de valor de la producción que representa el 2,5% del PIB (INE, 2019), el 24,8% del sector industrial, el 18% de las personas ocupadas y el 15,5% del valor añadido (Federación Española de Industrias de la Alimentación, 2019). Todas estas cifras reflejan su gran importancia a nivel económico. Una importancia que se espera que crezca de forma directamente proporcional al crecimiento de la población. Además de su importancia económica, presenta repercusión en otros ámbitos, tales como los ámbitos social y cultural, ya que los alimentos típicos de cada lugar y sus sabores reflejan la forma de vivir y son un rasgo identitario de cada sociedad (De Penna, 2001).

1.2 Problema energético y de cambio climático

La industria agroalimentaria, al presentar un gran tamaño e importancia, lleva asociados una serie de costes (energéticos y de materias primas) y de efluentes. A algunos de los efluentes que genera la industria agroalimentaria, todavía no se les ha conseguido encontrar un destino rentable o, incluso, viable a largo plazo. Algunos ejemplos de efluentes contaminantes de la industria agroalimentaria son las emisiones de CO₂ a la atmósfera o las aguas residuales tratadas. La industria agroalimentaria es la tercera industria que más energía consume en Europa (Confederación Europea de Industria agroalimentarias, 2018), la sexta en la República Popular China (Xie & Lin, 2019) y la quinta en Estados Unidos (Compton et al., 2018). Por otro lado, la cantidad de agua empleada por la suma de la industria agroalimentaria mundial corresponde a un 66% del total de este recurso consumido por el ser humano (Kirby et al., 2003). No obstante, también debido a su gran tamaño, la industria agroalimentaria presenta un inmenso potencial de mejora en el área de optimización energética y de recursos.

El compromiso para luchar contra el cambio climático comenzó a ser global en 1992, cuando se celebró la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), formada por 37 estados (Convención Marco, 1992). A partir de lo acordado en esta convención, se redactó, en 1997, en Japón, el protocolo de Kyoto, al que se adhirieron más de 55 estados, y entró en vigor en 2005 (Kyoto, 1998). Sin embargo, cuando Estados Unidos abandonó el acuerdo, siendo el mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI) del mundo, la confianza internacional en el protocolo disminuyó. La vigencia oficial del protocolo de Kyoto terminó en 2012. En la década siguiente, se celebraron distintas cumbres del clima en ciudades de todo el mundo (Doha, Varsovia...), con el objetivo de volver a alcanzar un acuerdo global, la última de ellas, la COP 25, se celebró en diciembre de 2019 en Madrid. Cabe destacar que la Unión Europea ha sido, desde el inicio de esta tendencia, la potencia más ambiciosa en este ámbito a nivel mundial.

Para conseguir el objetivo de mitigar, o a largo plazo eliminar el cambio climático, una de las medidas que están directamente

relacionadas, es la reducción progresiva de las emisiones de CO₂ asociadas a la industria. Para ello, los estados miembros de la Unión Europea tienen líneas de acción que buscan orientar y ayudar a las empresas a lograr dicha meta sin perder competitividad económica, a nivel regional, nacional y europeo. A nivel regional, en el caso de la Comunidad Valenciana, las más conocidas son las líneas de ayuda por I+D otorgadas por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial, tales como I+D PYME, CREATEC o de eficiencia energética, y otras de mayor volumen económico como los incentivos regionales, que otorgan fondos de procedencia europea (Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial, 2019). A nivel nacional, el Ministerio de Economía y Empresa (MINECO) provee de líneas de ayuda tales como Retos Colaboración, en colaboración con otras entidades como el Ministerio de Ciencia (Ministerio de Ciencia e Innovación, 2020), o los préstamos ofertados por el Instituto de Crédito Oficial (ICO), con condiciones favorables, para fines de aumento de la eficiencia energética o la reducción de emisiones (Instituto de Crédito Oficial, 2020). Por último, los programas europeos, tales como el H2030, los instrumentos PYME o EUREKA, que fomentan la colaboración de la empresa privada con organismos generadores de conocimiento como la universidad o los centros tecnológicos para lograr innovaciones en la línea del respeto al medioambiente mientras se es competitivo económicamente (Unión Europea, 2020).

Los elevados costes energéticos de la industria agroalimentaria, con sus asociadas emisiones de CO₂, proceden en gran medida de los procesos de calentamiento, que se realizan en algunas etapas de producción. Son los tratamientos que más energía requieren, y, por tanto, que más emisiones llevan asociadas, llegando a valores de hasta el 90% del total de emisiones de CO₂ y de energía consumida por algunos subsectores de la industria agroalimentaria, como por ejemplo el de lácteos o el de zumos. Además de la correspondiente huella hídrica provocada por esta etapa. (Federación Española de Industrias de la Alimentación, 2017).

En este sentido, uno de los grandes retos a los que se enfrenta la industria agroalimentaria es la mejora en estos procesos con el

objetivo de reducir al máximo el coste energético, y, por ende, las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

1.3 Procesos de calentamiento en la industria agroalimentaria

Para analizar adecuadamente las operaciones de transmisión de calor en la industria agroalimentaria, se deben comprender los mecanismos de transmisión de calor. La aportación de calor está regida por una combinación de leyes físicas independientes, estando divididas por tres métodos de transferencia de calor. Estos tres métodos son conducción, convección y radiación.

- **Conducción:** el calor fluye de las regiones más calientes a las más frías a través de un solo medio o a través de diferentes medios que están en contacto directo. La energía se transmite de esta manera entre las moléculas, sin necesidad de movimiento molecular. Según la teoría cinética, la temperatura es proporcional a la energía cinética promedio de las moléculas de un medio, y la energía interna representa la suma de todas las contribuciones de energía microscópica asociadas a dichas moléculas. El efecto detectable de la conducción es que la temperatura se nivela. Sin embargo, si las diferencias de temperatura se mantienen debido al calor suministrado o disipado, se establece un flujo de calor uniforme desde las regiones más cálidas a las más frías (Ruocco, 2018).
- **Convección:** el calor fluye de las regiones más calientes a las más frías mediante una acción combinada de conducción, variación del contenido de energía y mezcla: el modo de transferencia de calor más importante entre una superficie sólida y un fluido. Por ejemplo, desde una superficie más caliente, el calor se transfiere primero por conducción a las moléculas de fluido adyacentes (causando un aumento en la energía interna y la temperatura en el fluido) y luego las

moléculas calentadas se mueven a regiones de fluido más frías y se mezclan con ellas, liberando parte de su energía a otras moléculas. Por lo tanto, tenemos un flujo combinado de materia y calor; es decir, la energía es recogida por las moléculas móviles y disipada con ellas por su movimiento. Podemos distinguir entre convección libre o natural y convección forzada, de acuerdo con la causa que impulsa el movimiento. En el primero, el movimiento depende únicamente de las diferencias de densidad debido a los gradientes de temperatura; en este último, el movimiento es inducido por algún factor externo, como la bomba o el ventilador. Como la eficiencia de la transferencia de calor depende en gran medida del movimiento del fluido, el estudio de la convección se basa en el conocimiento de sus características de dinámica de fluidos (Ruocco, 2018).

- **Radiación:** el calor fluye de regiones más calientes a más frías sin contacto, incluso con vacío intercalado. El término "radiación" generalmente se refiere a cualquier propagación de ondas electromagnéticas, pero cuando se habla de transmisión de calor están en juego los fenómenos dependientes de la temperatura, que permiten el transporte de energía a través de medios transparentes o vacío. Todos los cuerpos emiten calor continuamente por radiación, con una intensidad que depende de la temperatura y el estado de la superficie. La energía radiante viaja a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y presenta las mismas características que la luz: es decir, radiación visible para el ojo humano, con frecuencias que pertenecen a un subconjunto del espectro de la radiación de calor más amplia. Por este motivo la transferencia de calor por radiación puede estudiarse en base a la teoría de las ondas. Cuando la radiación golpea a otro cuerpo, su energía se absorbe solo en las proximidades de la superficie expuesta. La transferencia de calor se vuelve más importante con el aumento de la temperatura, pero para aquellas aplicaciones en las que la temperatura no está

demasiado lejos del ambiente, la transferencia de calor por radiación puede no ser tenida en cuenta (Ruocco, 2018).

Los tratamientos térmicos, que ya se ha comentado que son responsables de un gran coste energético y emisiones de CO₂, son necesarios en numerosas operaciones unitarias dentro de la industria alimentaria. Se realizan con distintos objetivos, tales como asegurar la seguridad de los alimentos calentados, o producir algún cambio en sus características. Los más habituales en fluidos alimentarios, a nivel de cantidad de producto tratado en Europa, son los siguientes:

- Uperización o ultrapasteurización (UHT): consiste en exponer el alimento durante un corto plazo de tiempo (de 5 a 8 segundos) a una temperatura que oscila entre 150 y 200 °C, seguido de un rápido enfriamiento a una temperatura no superior a 40 °C. Esto suele realizarse de forma continua junto con el envasado posterior (envasado aséptico) y en recinto cerrado garantizando que el producto no se contamine. Se aplica principalmente en leche y zumos, (Tortora et al., 2007).
- Pasteurización: consiste en aplicar combinaciones variables de tiempo-temperatura, que a priori son más ligeras que en la uperización (por ejemplo 72 °C durante 15 segundos). Puede realizarse en continuo o por lotes. (Hayes, 1993) Es común en leche y zumos en diversos países de Europa, pero tiene la desventaja de que la vida útil de los alimentos resultantes es menor que la esterilización. Pese a esto, es posible que gane protagonismo próximamente gracias a ciertas tendencias de consumo como la búsqueda de alimentos frescos y con el menor procesado posible.
- Atemporado: modificar la temperatura del fluido previa al calentamiento o enfriamiento, acercándola a la adecuada para el consumo y teniendo lugar un cambio de estado

(Yarmand & Homayouni, 2011), el ejemplo más común es el descongelado. Se aplica sobre todo en chocolates, mantequillas, mermeladas, salsas, algunos purés y zumos muy concretos de frutas exóticas en las que una parte significativa de la producción tiene que viajar grandes distancias desde su origen de producción al lugar de consumo, donde se descongelan y envasan.

La aplicación de los tratamientos térmicos citados, aunque es necesaria para garantizar la seguridad alimentaria (o su viabilidad en el caso del atemperado), tiene como contrapartida que puede afectar a las cualidades organolépticas de algunos alimentos. Algunos ejemplos son la leche, en la cual afecta a algunos nutrientes de naturaleza lipídica, que son los más termolábiles (Yadav & Sircar, 2019) o los zumos de diversas frutas, tales como manzana (Siguemoto et al., 2019), cítricos (Achir et al., 2016), o pera (Saeduddin et al., 2015), entre muchas otras. En el caso de las frutas afectan a algunas vitaminas, carotenoides o compuestos enzimáticos con valor nutricional, haciendo que se reduzcan. Para que esto no ocurra, se buscan las mejores combinaciones tiempo-temperatura. Actualmente, para realizar tratamientos de transmisión de calor a alimentos fluidos, los equipos más utilizados en la industria son los intercambiadores de calor (Raja et al., 2017).

1.4 Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos sin mezclarse entre ellos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. En los intercambiadores de calor intervienen habitualmente mecanismos de conducción, entre la capa límite del fluido calefactor, el material del intercambiador, y la capa límite del fluido calefactado, por contacto (conducción), y convección, en el fluido calefactado distribuyendo el calor recibido. Para maximizar la eficiencia energética, y además, que el líquido a calentar alcance una temperatura homogénea, se suele buscar que el fluido circule en régimen turbulento, y no laminar, pero hasta un

cierto grado de turbulencia (no el máximo posible), ya que provocar un régimen de circulación turbulento requiere invertir en una bomba que pueda proveer un mayor poder de impulsión, aumentando así el precio inicial de la instalación. Se entiende como flujo turbulento aquel que se mueve de forma desordenada, formando pequeños remolinos periódicos no coordinados, y cuyo comportamiento sólo se puede predecir hasta cierto punto (estando relacionado de forma directamente proporcional con la velocidad de circulación y el rozamiento con las paredes). Por el contrario, el flujo laminar es aquel que circula en capas o estratos, sin mezclarse entre sí, dividido entre lo que se conoce como láminas de corriente.

El tipo de intercambiadores de calor más usado en alimentos son los intercambiadores en superficie. En los intercambiadores de calor en superficie, dos fluidos, caliente y frío, se exponen a contacto indirecto entre ellos, separados por un material determinado, que se busca que sea un buen conductor de la temperatura (por este motivo, suelen ser de materiales metálicos). Dentro de este tipo de intercambiador, los más habituales son los intercambiadores de calor de placas, en los que la superficie de separación entre los fluidos es una pared (que puede ser plana, o no), y los tubulares, en los que la separación entre los fluidos es siempre la pared de un tubo cilíndrico, por cuyo interior circula uno de ellos, mientras el otro lo hace por el exterior. Ambos fluidos pueden funcionar en paralelo, cuando circulan en el mismo sentido, o en contracorriente, cuando los fluidos calefactor y calefactado circulan en sentido opuesto (Kreith & Bohn, 2001).

Lo más habitual para estos tratamientos, es que el fluido calefactor sea agua caliente para temperaturas de hasta 100°C, y vapor de agua (o aceite) para temperaturas superiores. Para calentar el fluido calefactor, se utilizan habitualmente calderas, que funcionan mediante fuel (u otros combustibles fósiles) y ocupan una gran cantidad de espacio, lo cual es una desventaja añadida ya que aumenta en gran medida los costes y requerimientos para la empresa productora.

Para llevar a cabo procesos en los que intervienen intercambiadores de calor y que su resultado sea el deseado, se deben diseñar con precisión. El calor transferido de un fluido a otro a través de una pared viene dado por la ecuación de diseño de un intercambiador (ecuación 1) (Shah & Sekulic, 2003). En dicha ecuación Q es el flujo de calor transferido, medido en julios por segundo, A es el área de transferencia de calor, medida en m², ΔT la diferencia de temperatura entre ambos fluidos, medida en K, y U el coeficiente global de transferencia de calor, expresado en w/m²·k:

$$Q=U \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

Sin embargo, la ecuación de de diseño de un intercambiador de calor solo es aplicable si las temperaturas de los dos fluidos son constantes. Un intercambiador de calor es en numerosas ocasiones un sistema en régimen no estacionario, por lo que no es aplicable. Si se integra teniendo en cuenta una serie de límites, se obtiene una ecuación similar pero que tiene en cuenta la temperatura media logarítmica, haciéndola así válida para su aplicación (ecuación 2).

$$Q= A_r \cdot U \cdot \Delta T_{ML} \quad (2)$$

Donde

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \right)}$$

Una de las variables más importantes para que un proceso de calentamiento sea viable económicamente es la eficiencia energética. Se considera eficiencia energética en los procesos de calentamiento a

la proporción de energía emitida que se transmite a la sustancia a calentar, y no se pierde de forma indeseada (al ambiente o a otros elementos del proceso). La eficiencia actual de los intercambiadores de calor oscila entre 30 y 60 %, dependiendo de factores como la calidad del equipamiento y sus materiales, el área de transferencia, la reología del fluido a calentar o la temperatura máxima objetivo (Choi et al., 2018). Por ejemplo, los intercambiadores de calor en contracorriente, por lo general ofrecen una mejor eficiencia energética, ya que la diferencia de temperatura en el global del proceso es mayor, mientras que los intercambiadores de calor en paralelo suelen ofrecer otras ventajas, como mayor precisión de calentamiento o menor precio (Levenspiel, 2014).

Existen diversos métodos de optimización, que buscan maximizar la eficiencia energética de los intercambiadores de calor. Muchos de ellos están basados en reducir la caída de presión global de ambos fluidos circulantes, o en maximizar tanto la superficie como el coeficiente global de transmisión de calor, que es una magnitud propia del equipo, basada sobre todo en sus materiales de construcción. También existen estudios que buscan mejorar la eficiencia energética diseñando superficies modificadas (aletas, chevrones, etc), que afectan principalmente a los intercambiadores de calor de placas, aunque también pueden ser aplicados a otros tipos, como por ejemplo los intercambiadores de calor tubulares (Balasubramian & Puri, 2009).

Otra forma de analizar la eficiencia de un proceso de calentamiento en general, y concretamente de los intercambiadores de calor, es desde el punto de vista termodinámico. Los procesos generan entropía, que es una magnitud que mide el desorden molecular ocasionado al sistema por el proceso, o lo que es lo mismo, la parte de la energía empleada que no es utilizable para realizar trabajo. Si un proceso es irreversible, se considera que genera entropía. El concepto de mínima entropía generada en un proceso (mínima irreversibilidad), se conoce como exergía (potencial de trabajo útil que puede alcanzar un sistema en un entorno determinado) aunque es una magnitud de la que no se puede medir el valor absoluto, sólo su variación (Torabi et al., 2016).

En ocasiones, los intercambiadores de calor también tienen un problema asociado conocido como factor de ensuciamiento o fouling. Un ejemplo de este fenómeno, que se da a menudo y por lo tanto es representativo de la industria agroalimentaria, ocurre cuando, al alcanzar una temperatura determinada, coagulan ciertas proteínas de la leche, depositándose así en codos o lugares de difícil acceso del equipo (Jun & Puri, 2004). Para solucionar, o al menos, reducir el problema de fouling, periódicamente, se detiene la producción y se aplican procedimientos Clean-In-Place(CIP), los cuales consisten en pasar agua caliente mezclada con un detergente alcalino, que arrastra dicha suciedad (Li et al, 2017).

Existen algunos procesos térmicos en los que se emplean resistencias eléctricas u otros métodos de calentamiento, mayormente alimentados por electricidad (por ejemplo, el atemperado). El motivo por el cual se emplean equipos alimentados por electricidades que presenten una mayor precisión a la hora de regular la temperatura objetivo (Chen et al., 2020). Dicho aumento de precisión lleva asociada la desventaja de que la electricidad tiene, actualmente, un precio de aproximadamente el triple que los combustibles fósiles (Selectra, 2020), con lo que su coste de funcionamiento es elevado.

Para hacer frente a estos enormes costes energéticos, además de la ya citada optimización de los intercambiadores de calor, se ha trabajado en desarrollar nuevas tecnologías, con sus correspondientes aplicaciones que permitan conseguir los objetivos de incremento de temperatura marcados con una mayor eficiencia energética.

1.5 Nuevas tecnologías en la industria agroalimentaria

Con el objetivo de mejorar el aprovechamiento energético, y al mismo tiempo, disminuir o eliminar la pérdida de calidad de algunos productos, se están desarrollando nuevas tecnologías que cumplan los mismos objetivos de seguridad y calidad alimentaria. Una de las formas de clasificar las tecnologías de reciente aplicación en la industria agroalimentaria consiste en dividir las tecnologías

térmicas y no térmicas. A continuación, se citan algunas de ellas. Aunque todas tienen sus campos de aplicación, ninguna ha logrado desplazar, a gran escala, las formas de calentamiento tradicionales, es decir, los intercambiadores de calor.

Tecnologías no térmicas

Se entiende como tecnología no térmica, a aquella cuyo efecto no tiene lugar debido al incremento de temperatura del alimento a tratar.

La irradiación es una tecnología que consiste en la aplicación de energía ionizante, es decir, una radiación cuya energía es lo suficientemente alta para desplazar los electrones de los átomos o moléculas y convertirlos en partículas eléctricamente cargadas, llamadas iones. De esta forma, la irradiación es capaz de alterar la polaridad de las membranas de los microorganismos, aumentando su sensibilidad a condiciones adversas. Su objetivo es mejorar la conservación de los alimentos y se realiza normalmente en combinación con otros métodos clásicos, como la aplicación de frío o de calor. Actualmente, algunos ejemplos de su empleo son la esterilización de carne, la conservación de fruta fresca y la producción de zumos. Esta tecnología ha sido adoptada principalmente en América, mientras que, en Europa en menor medida, debido a que la legislación es restrictiva con ella, exigiendo que sólo se aplique cuando es “tecnológicamente necesario” y en dosis inferiores a 10 kilograys (Directiva Euratom, 2013). Sus principales ventajas son que, al no ser sometidos a la acción del calor, no modifican sus cualidades organolépticas, no requieren aditivos químicos, sus necesidades energéticas son muy bajas y puede controlarse automáticamente, requiriendo muy poca mano de obra. Presenta las desventajas de no afectar a las enzimas, por lo que existen muchos ejemplos de procesos de degradación que están relacionadas con las enzimas y que esta tecnología no es capaz de evitar (por ejemplo, oxidación o pardeamiento), y especialmente la reticencia del consumidor a consumir alimentos a los que se les ha aplicado este tratamiento, pese a que se ha demostrado su seguridad (Morata, 2010).

La tecnología de aplicación de altas presiones hidrostáticas consiste en someter al alimento a presiones muy elevadas, con el objetivo de reducir su carga microbiana. Sus ventajas son que mantiene la calidad organoléptica, nutricional y sensorial del alimento, mejorando la seguridad alimentaria. Suele combinarse con otros tratamientos como elevación o disminución de la temperatura, adición de productos químicos, procesado por pulsos eléctricos o ultrasonidos. Se ha aplicado de forma satisfactoria para prolongar la vida útil de zumos de frutas y mermeladas, desarrollar nuevos productos, elaborar alimentos precocinados y congelar y descongelar rápidamente (Morata(b), 2010).

La tecnología de luz ultravioleta aplica una radiación no ionizante con propiedades germicidas sobre la superficie de alimentos. Tiene muy bajo poder de penetración, lo cual es una de sus desventajas, ya que limita en gran medida el caudal de fluido que se puede tratar. Tiene, entre otras aplicaciones industriales, la de tratar zumos de frutas (Morata(c), 2010) y algunas semillas, como las de pimienta negra (Erdogdu & Ekiz, 2013).

La ozonización consiste en producir ozono y añadirlo a los fluidos a tratar. Su actuación se debe a que el ozono es un oxidante muy fuerte y, en consecuencia, un desinfectante muy potente. Tiene la desventaja de ser inestable, y, por este motivo, tiene que producirse en el momento, por lo que sus aplicaciones se reducen a plantas de desinfección de agua y otros productos, no pudiéndose aplicar en cualquier parte de la cadena de producción (Morata(d), 2010). Recientemente está ganando popularidad en diversos procesos por haber demostrado su capacidad para reducir significativamente los pesticidas o plaguicidas que llegan al producto final (Pandiselvam et al., 2020).

La aplicación de ultrasonidos de alta intensidad consiste en producir, por medio de un transductor, ondas de una frecuencia superior a la detectable por el oído humano con una intensidad superior a 1 W/cm^2 , produciendo agitación de la materia, lo cual tiene un efecto acelerador de todos los fenómenos de transferencia de materia (posibles reacciones que se den en el alimento, combinaciones con

otros tratamientos como secado, etc). Las aplicaciones más frecuentes de esta tecnología son la extracción de compuestos de interés, inactivación de enzimas, limpieza, homogeneización, eliminación de espuma o secado (Morata(e), 2010).

Existen otras tecnologías que todavía están en fase de desarrollo e investigación, como por ejemplo la aplicación de CO₂ supercrítico para extracción de procesos (Bastante et al., 2018), u otras como la aplicación de pulsos de luz, o de campos magnéticos oscilatorios (Morata (f), 2010). Todavía no se han aplicado satisfactoriamente a nivel industrial a gran escala, pero algunas de estas tecnologías se considera que tienen un gran potencial para procesos y productos muy concretos.

Tecnologías térmicas

Se han desarrollado recientemente numerosas tecnologías cuya aplicación se basa en incrementar la temperatura del alimento, como por ejemplo el calentamiento óhmico o las microondas.

El calentamiento óhmico consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un alimento conductor, aumentando así su temperatura y alterando otras de sus propiedades, ya que, al aumentar la permeabilidad de las membranas de sus células, su textura y dureza se ven claramente afectados, es por esto por lo que sólo se puede emplear en líquidos de forma viable. Algunas de sus aplicaciones más recientes son esterilización de zumos de naranja, de tomate, de agua de peptona, y un largo etc, pero no es competitivo a nivel de eficiencia energética (Makroo et al., 2020).

Una de las tecnologías térmicas no convencionales con más protagonismo actualmente son las ondas electromagnéticas, las cuales son una combinación entre campos eléctrico y magnético que se propaga transportando energía. En las ondas electromagnéticas, los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares entre sí y ambos, a su vez, perpendiculares en la dirección de propagación de la onda.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda (λ), medida en múltiplos o submúltiplos del metro, y su frecuencia (f),

medida en Hertzios, o ciclos por segundo, ambas magnitudes son inversamente proporcionales, según la relación $f = 1/\lambda$. Las ondas electromagnéticas se distribuyen y clasifican, según su frecuencia, en lo que llamamos espectro electromagnético, representado en la Figura 0.1.1. Las microondas son las ondas electromagnéticas que, dentro del espectro electromagnético, están comprendidas en la banda de frecuencias entre los 300 MHz y los 300 GHz. Las microondas, al contrario que la irradiación citada anteriormente, se encuentra dentro de las radiaciones no ionizantes, ya que carecen de la energía suficiente para desplazar un electrón y, por tanto, producir ionización (Poazar, 2011).

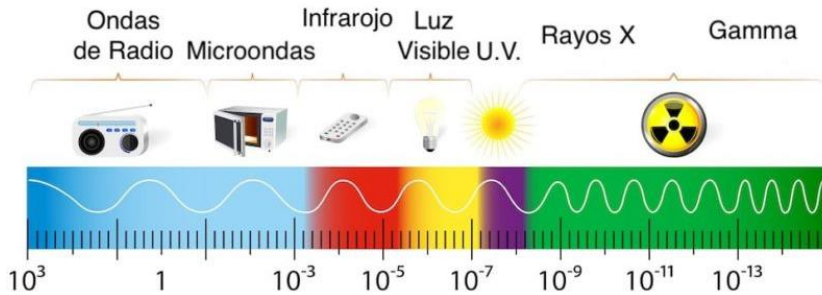


Figura 0.1. Espectro electromagnético (Gupta & Leong, 2008)

Dado que la banda de microondas se utiliza principalmente para aplicaciones de comunicaciones (radar, telefonía, wifi...) es necesario evitar que las aplicaciones de calentamiento industriales o domésticas provoquen interferencias en las comunicaciones, para ello, se han reservado para las aplicaciones de procesamiento de materiales por microondas, las bandas de frecuencias denominadas ISM, que son bandas de uso libre, con ciertas restricciones, y que están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas. Las frecuencias más utilizadas son 433MHz, 915MHz, 2450MHz, y 5800 GHz (Poazar (b), 2011).

Para entender las aplicaciones de calentamiento por microondas, hay que tener en cuenta que las microondas no son una forma de calor por sí mismas, sino de energía. El calentamiento se produce gracias a la interacción de las microondas con el material a calentar, que hacen que la energía contenida en la onda se libere en este, en forma de aumento de temperatura. La interacción de la onda con los materiales está determinada por las propiedades dieléctricas de los mismos. Las propiedades dieléctricas son propiedades intrínsecas de cada material, que varían según la frecuencia de microondas y las propiedades fisicoquímicas del material. Estas son magnitudes complejas (con parte real e imaginaria) que reflejan el comportamiento del material en función del campo eléctrico (permitividad, ϵ) y magnético (permeabilidad, μ) aplicado, normalmente se utilizan en forma relativa (dividiendo la magnitud real por la del aire) para evitar utilizar unidades teniendo así permitividad relativa compleja (ϵ_r) y la permeabilidad relativa compleja (μ_r). En el caso de alimentos, la componente magnética es nula, por lo que se definen por sus características eléctricas. Por lo tanto, el calentamiento se produce por la interacción de algunos componentes de los alimentos (como el agua, que es un dipolo muy abundante en alimentos y las sales o iones) con la componente eléctrica del campo electromagnético (Nelson, 2008).

Algunos de los métodos por los cuales los materiales se calientan cuando son expuestos a radiación de microondas son la polarización eléctrica, polarización dipolar, polarización iónica, interfacial o las pérdidas por conducción. Los métodos de polarización se representan gráficamente en la Figura 0.2.

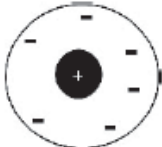

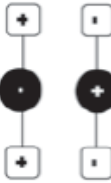
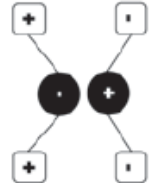


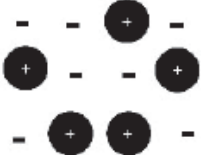

	No E field ($E = 0$)	← Local E field ($E \neq 0$) ←
Electronic		
Atomic or Ionic		
Orientation or Dipolar		
Interfacial		

Figura 0.2 Diferentes mecanismos de polarización de las microondas (Gupta & Leong (b), 2008)

Para el calentamiento por microondas, o dieléctrico, de un material conocido, el calor generado en relación con el volumen del material radiado viene dado por la ecuación 2:

$$Q = \omega \cdot \varepsilon''_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia angular de la radiación de excitación, ε''_r es la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja del material absorbente, también llamado factor de pérdidas o simplemente

perdidas dieléctricas, ϵ_0 es la permitividad del espacio libre y E la intensidad del campo eléctrico. La parte imaginaria de la permitividad relativa (dependiente de la frecuencia de las microondas) es una medida de la capacidad de un material dieléctrico para convertir la energía del campo electromagnético en calor. La energía disipada es la fuente de calor observada en un proceso de calentamiento por microondas.

Otra magnitud importante a la hora de diseñar un proceso de calentamiento por microondas es la profundidad de penetración. Se define como la distancia desde la superficie del material en la que la intensidad de campo se ha reducido hasta un $1/e$ (e es el número de Euler, 2.718, por tanto, supone una reducción de hasta el 37%) de su valor en superficie. Este valor es primordial a la hora de diseñar procesos de calentamiento o secado por microondas. Gracias a conocer esta magnitud se puede, por ejemplo, evitar calentamientos insuficientes en profundidad, o problemas de sobrecalentamiento central, que es un fenómeno no deseado de escasa o nula homogeneidad de calentamiento, que se da cuando el diámetro del alimento a calentar está entre 1 y 3 veces la profundidad de penetración (Gupta & Leong (c), 2008).

Aplicaciones de las microondas en la industria agroalimentaria: Equipos industriales

La aplicación de calentamiento por microondas más común es el microondas doméstico. Sin embargo, a nivel industrial, pese a que se ha desarrollado un gran número de aplicaciones, pocas han sido implantadas a gran escala (Tang, 2015). Esto puede deberse a la implementación inadecuada de la tecnología a causa del escaso conocimiento de esta, o a la necesidad de adaptar cada equipo para cada producto y caudal de producto determinado (ya que el calor generado depende de las condiciones del producto y no del equipamiento en sí, como si que ocurre en las tecnologías convencionales). Sin embargo, también cabe mencionar que las aplicaciones que se han implantado, como por ejemplo el vulcanizado de caucho, tienen un gran éxito, alcanzando unos volúmenes de producto tratado enorme, hasta el punto de haber

requerido de desviar ríos enteros para controlar la refrigeración de los magnetrones.

Algunos ejemplos de las aplicaciones de microondas a nivel industrial son el reformado de gases de síntesis, secado de materiales de construcción, secado de lodos, entre muchas otras (Menendez, 2017). También, se ha demostrado que es posible pasteurizar y esterilizar, por lotes, satisfactoriamente, una gran variedad de alimentos fluidos, que van desde leche humana (Malinowska-Panczyk et al., 2019) hasta zumos de tamarindo (Gonzalez-Monroy et al., 2018) o zanahorias envasadas (Peng et al., 2017).

Tang et al., (2013-2018) desarrollaron un equipo de esterilización por microondas combinado con altas presiones hidrostáticas, al cual llamaron MATS (Microwave Assisted Thermal Sterilization). En él, esterilizaron satisfactoriamente mejillones (Ovissipour et al., 2013), espinacas (Aamir et al., 2014) y huevos (Zhang et al., 2013), entre otros alimentos. Además, establecieron el modelo de calentamiento del equipo (Resurrección et al., 2013) y desarrollaron métodos para seguir la evolución de la temperatura a tiempo real mediante sensores no destructivos y que además no alteran la distribución de campo de microondas (Luan et al., 2015).

También es muy conocida por el público general, la posibilidad de calentar alimentos fluidos (agua, leche, sopa...) por microondas, ya que existe un horno microondas en una gran cantidad de hogares. Utilizando una forma de calentamiento similar, aplicada a mayor escala, existen equipos que, mediante una tubería de politetrafluoroetileno (más conocido como teflón, un plástico transparente a las microondas), hacen circular un fluido y le aplican microondas, calentándolo en línea rápidamente. Salvi et al (2009) emplearon un equipo de estas características para calentar distintas disoluciones modelo (sacarosa en agua, NaCl en agua, HCl en agua...) con el objetivo de correlacionar diversos parámetros con el calentamiento y de esta forma tener un conocimiento más profundo de los efectos de cada una de sus variables (potencia, diámetro de tubería...) en el resultado final. Stratakos et al (2016) empleó otro equipo similar, demostrando su viabilidad para pasteurizar 100 litros

por hora de zumo de tomate con 18 kw de potencia obteniendo un producto final con condiciones similares al tratado por mecanismos convencionales. Tuta et al (2017) produjeron un modelo de predicción del calentamiento de fluidos con viscosidades elevadas (aceites, purés...), demostrando que la viscosidad no es un impedimento para el funcionamiento de un equipo de estas características.

Además de las operaciones de esterilización, pasteurización y calentamiento de fluidos en línea, algunas de las aplicaciones más comunes de microondas en alimentos son el secado de semillas, frutas y hortalizas (Heredia 2010; Radoui 2020). El secado de frutas y hortalizas asistido por microondas se realiza en todo el mundo (Menendez (d) 2017), pero más comúnmente y con mayor volumen en países de Sudamérica y Centroamérica, ya que son los mayores productores. Esta etapa unitaria se realiza con los objetivos habituales del proceso de secado en la industria alimentaria, el más común de ellos es reducir la actividad de agua del alimento, lo que evita o ralentiza numerosas reacciones químicas o enzimáticas, y por tanto aumenta su tiempo de conservación, pero también existen otros objetivos, tales como aumentar la facilidad de transporte o manipulación del alimento (Menon et al., 2020). Las microondas realizan un secado volumétrico, lo que quiere decir que secan en profundidad, al contrario que las formas de secado convencionales, por aire caliente, que secan en superficie (siempre teniendo en cuenta la profundidad de penetración de las microondas a una determinada frecuencia para el material o alimento concreto a secar) (Radoui 2020). Esto afecta de forma marcada, minimizando, y en algunos casos eliminando el periodo de velocidad decreciente en el secado, manteniendo la velocidad de secado constante, prácticamente hasta que se ha eliminado toda la humedad del alimento (Le & Jittanit, 2015).

Como ya se ha comentado anteriormente, la electricidad, que es la fuente de alimentación de los equipos industriales de microondas, tiene un precio aproximado del triple que los combustibles fósiles, por lo que realizar un proceso de secado completamente con microondas, no sería económico. Existen numerosos estudios de

optimización del proceso de secado que inician aplicando únicamente aire caliente, y una vez concluye el periodo de velocidad constante, asisten el proceso con energía de microondas, aumentando así la duración de este periodo y reduciendo la duración total del secado, con el consiguiente ahorro energético (Jafari et al., 2018). Sin embargo, estos procesos deben estar diseñados cuidadosamente y a medida para cada alimento, porque, en caso de extraer la humedad del alimento con una velocidad excesiva, puede provocar un gradiente excesivo que ocasione perjuicios en su integridad o sus propiedades mecánicas (Horrungsiwat et al., 2016). Otra de las desventajas que en muchas ocasiones, es difícil realizar un secado por microondas totalmente homogéneo, por lo que se debe diseñar un secado a medida para alcanzar los objetivos de eliminar la humedad (Radoui 2020).

Un ejemplo típico de equipamiento de microondas, que realiza procesos de calentamiento por lotes es el horno industrial de microondas. Es un equipamiento similar al horno microondas doméstico, pero con una potencia de a partir de 2000 W, y que, además, tiene habitualmente automatismos en la entrada y salida del material a calentar. La figura 0.3 muestra un ejemplo típico de estos equipos, también comercializado por la empresa SAIREM SAS, cuya función más habitual es la de cocción, por ejemplo, para platos preparados (Sairem SAS, 2020).



Figura 0.3 horno industrial de microondas (Sairem SAS 2020)

En la aplicación de secado, además de en otras como horneado o protección y eliminación de plagas, es donde se utiliza uno de los equipos industriales de microondas más extendidos actualmente, el túnel de microondas. Se trata de un equipo que aplica energía de microondas a alimentos (o a cualquier otra carga, en su caso) que son transportados de forma continua mediante una cinta transportadora. Algunos combinan la aplicación de microondas con la de otros métodos de calentamiento, como por ejemplo aire caliente. Pueden tener distintas potencias y estar divididos en módulos. Un ejemplo típico de túnel de microondas, en este caso comercializado por la empresa Sairem SAS, se muestra en la figura 0.4. Pueden observarse los módulos de entrada y salida del alimento por cinta transportadora, los cuales están diseñados específicamente para evitar fugas, ya que se trata de una cavidad de microondas abierta. También están indicadas las puertas de emergencia en la cavidad en la que se aplican las microondas, y botones de paro de emergencia. Tiene una potencia regulable de hasta 5000 W.



Figura 0.4 túnel de microondas (Sairem SAS 2020)

Además de los ya mencionados, existen numerosos equipos industriales que aprovechan la tecnología de microondas en procesos relacionados con la industria agroalimentaria o en laboratorios adscritos a esta, tales como la extracción de compuestos, como aceites esenciales (Mollaei, 2019), síntesis de ciertas sustancias químicas (Kumar et al., 2020), etc. La variedad de equipos que emplean esta tecnología es extensa y excede el campo de este trabajo, no obstante, su variedad demuestra el interés por esta tecnología.

1.6 Célula Básica de Transferencia de Energía

Microbiotech es una empresa española, reconocida como empresa de base tecnológica, ubicada en Vilamarxant (Valencia). Esta empresa está formada por personal altamente especializado que aúna conocimientos de microondas, cerámicas técnicas, y de materiales biológicos, especialmente alimentos (de ahí su nombre Micro - microondas, bio - materiales biológicos o alimentos, tech - cerámicas técnicas). Combinando esas áreas de conocimiento, desarrollaron una tecnología, a la cual llamaron Célula Básica de Transferencia de Energía (CBTE, también referida en este documento como BCET por sus siglas en inglés "Basic Cell of Energy Transference"). Este sistema

es la base de la patente titulada “Célula Calefactora, Calefactor que hace uso de la misma, Sistema de calefacción y uso del mismo” (Fernandez et al., 2015) que actualmente tiene vigencia en España, Francia y Alemania.

El funcionamiento de la tecnología CBTE se basa en conducir la energía de microondas mediante un cable coaxial, hasta llevarla a otro material, que debe presentar elevadas pérdidas dieléctricas, es decir, absorber de forma muy eficiente la energía de microondas y aumenta rápidamente su temperatura. Esta forma de transmisión de la energía, mediante microondas conducidas, difiere completamente de las cavidades y túneles de microondas que se han descrito en el apartado anterior y que, hasta ahora, han tenido un amplio desarrollo industrial

Para que la CBTE funcione correctamente, el material con pérdidas debe tener las dimensiones exactas, para que toda la energía de la onda conducida se disipe en él, alcanzando una gran eficiencia (de más del 99%), y absorbiendo toda la energía sin riesgo de fugas que puedan afectar a los usuarios. Además, el material de destino de la energía de microondas conducida (que es donde se genera el calor en esta forma de calentamiento), debe tener una composición que le permita absorber bien esa energía, como es el caso de los AM²H (Advanced Materials for Microwave Heating), los cuales son materiales avanzados diseñados específicamente para el calentamiento por microondas, mediante la adición de un compuesto absorbente de microondas (llamado susceptor) a una matriz cerámica que habitualmente no lo contendría. La pieza de AM²H implícita en los equipos de tecnología CBTE se utiliza como elemento calefactor, calentándose gracias a la energía de microondas que, en este caso, les llega de forma conducida, y esta ejerce su función de calentar el alimento objetivo mediante métodos de calentamiento convencionales, es decir, conducción y convección, no por microondas aplicadas directamente. Se busca aprovechar, a través de los AM²H, la velocidad de calentamiento habitualmente asociada a la energía de microondas (y maximizada mediante los susceptores) y la retención de temperatura típicamente asociada a muchos de los materiales cerámicos convencionales.

El material, cuya optimización se incluye en este trabajo, se integra en nuevos dispositivos capaces de conducir energía de onda (2,45 GHz) para calentar el AM²H con una eficiencia mayor del 99% y transmitir el calor generado al medio que le rodea únicamente por conducción y convección (evitando cualquier radiación/fuga de microondas. Pero, como en cualquier tecnología novedosa, requiere la fabricación y validación por medio de prototipos de distintas escalas en las sucesivas etapas de desarrollo, lo cual conlleva una gran inversión por parte de quien desee explotar la tecnología.

Se espera que, una vez desarrollada completamente, la tecnología CBTE sea una nueva alternativa al calentamiento de fluidos convencional, que pueda aportar una mayor eficiencia energética, siendo alimentada exclusivamente por fuentes de alimentación eléctricas. De esta forma, la tecnología podrá beneficiarse de las ventajas de energías renovables, y ser competitiva en precio frente a los combustibles fósiles.

1.7 Simulación multifísica y optimización

El diseño de cualquiera de los mencionados procesos térmicos, tanto convencionales (intercambiadores de calor) como, e incluso en mayor medida, innovadores (equipamiento industrial de microondas, calentamiento óhmico, etc), lleva asociado un alto coste de tiempo y recursos. En ocasiones, cuando el diseño del equipo presenta novedades sustanciales, es recomendable disponer de prototipos en los que validar dichas novedades, los cuales encarecen la innovación en gran medida. Por este motivo, para optimizar el proceso y potenciar la exactitud del diseño sin necesidad de realizar sucesivos prototipos tras cada mejora, han proliferado softwares que buscaban solucionar esta problemática. Algunos ejemplos son el algoritmo genético, la evolución diferencial, la agrupación de partículas o el algoritmo de calentamiento simulado. Dichos softwares eran incompletos y sólo podían predecir los fenómenos en condiciones muy específicas y hasta cierto punto, por lo que no resolvían el problema. Con el incremento del poder computacional, se desarrollaron los softwares de simulación multifísica. Dichos

softwares emplean conocimientos conjuntos de física, química, biología, termodinámica y otras ciencias, para simular la mayor cantidad posible de variables del proceso (calentamiento, circulación de los fluidos, etc), con el máximo realismo (Abeykoon, 2020).

Los softwares de simulación multifísica aplican ecuaciones de cada uno de los fenómenos que tienen lugar en modelos 2D o 3D cada vez más exactos. Lo hacen dividiendo el sistema en triángulos de un tamaño variable, según la resolución necesaria, a lo cual se le denomina tamaño de mallado (mesh). Algunos ejemplos de softwares de simulación multifísica y más conocidos, son el COMSOL Multiphysics (COMSOLAB, 2017) o el ANSYS (FLUENT, 2019). La principal diferencia entre ambos radica en el aspecto técnico, ya que el COMSOL divide el sistema a simular en elementos finitos, y el ANSYS en volúmenes finitos, pero en la práctica, ambos pueden ser usados con similares resultados para la gran mayoría de proyectos. También se pueden utilizar para hacer frente a problemas concretos de transferencia de materia tales como eliminar, o reducir al máximo, la aparición del fouling, fenómeno explicado en el apartado 1.3(Pace et al., 2011).

En muchas ocasiones, no sólo se quiere mejorar una de las variables del equipo (intercambio de calor, eficiencia, temperatura máxima, etc), sino que existen diversas limitaciones a tener en cuenta (precio inicial máximo, espacio disponible...). Por este motivo, a los softwares de simulación multifísica, se les asocian a menudo algoritmos de optimización multiobjetivo. Estos algoritmos tienen en cuenta todas las variables del sistema y del proceso a llevar a cabo, y alcanzan diversas "soluciones ideales" según la importancia de los parámetros y los resultados que se quieren optimizar. De esta manera, los algoritmos pueden trabajar de forma asociada con los softwares multifísica, complementándose de una forma muy completa y satisfactoria en cualquier proceso de diseño de maquinaria novedosa (Abakarov, 2009).

1.8 Bibliografía

Aamir, M., Ovissipour, M., Rasco, B., Tang, J., & Sablani, S. (2014). Seasonality of the thermal kinetics of color changes in whole spinach (*spinacia oleracea*) leaves under pasteurization conditions. *International journal of food properties*, 17(9), 2012-2024.

Abakarov, A., Sushkov, Y., Almonacid, S., & Simpson, R. (2009). Multiobjective optimization approach: Thermal food processing. *Journal of Food Science*, 74(9), E471-E487.

Abeykoon, C. (2020). Compact heat exchangers–Design and optimization with CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118766.

Achir, N., Dhuique-Mayer, C., Hadjal, T., Madani, K., Pain, J. P., & Dornier, M. (2016). Pasteurization of citrus juices with ohmic heating to preserve the carotenoid profile. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 397-404.

Agreement, P. (2015). Paris agreement. In Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris). (Vol. 4, p. 2017).

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2019

Balasubramanian, S. & Puri, V.M. (2009). Thermal energy savings in pilot scale plate heat exchanger system during product processing using modified surfaces. *Journal of Food Engineering*, 91, 608-611

Bastante, C. C., Cran, M. J., Cardoso, L. C., Serrano, C. M., de la Ossa, E. M., & Bigger, S. W. (2019). Effect of supercritical CO₂ and olive leaf extract on the structural, thermal and mechanical properties of an impregnated food packaging film. *The Journal of Supercritical Fluids*, 145, 181-191.

Chen, Y. X., Guo, X. N., Xing, J. J., Sun, X. H., & Zhu, K. X. (2020). Effects of wheat tempering with slightly acidic electrolyzed water on the microbial, biological, and chemical characteristics of different flour streams. *LWT*, 118, 108790.

Choi, Y. H., Song, D., Seo, D., & Kim, J. (2018). Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand. *Energy and Buildings*, 172, 152-158.

Compton, M., Willis, S., Rezaie, B., & Humes, K. (2018). Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest. *Innovative food science & emerging technologies*, 47, 371-383.

COMSOL Multiphysics User's Guide, COMSOLAB, 2017

Confederación Europea de Industrias Agroalimentarias: Informe anual europeo de 2019 de la comisión de industrias agroalimentarias

De La Convención, P. D. K. (1998). Marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*, 25, 27.

de Kyoto, P. (1998). Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

DIRECTIVA 2013/59/EURATOM DEL CONSEJO. Diario oficial de la Unión Europea. 5 de diciembre de 2013.

DIRECTIVA 2004/108/CE. Diario Oficial de la Unión Europea. 15 de diciembre de 2004.

Erdoğdu, S. B., & Ekiz, H. İ. (2013). Far infrared and ultraviolet radiation as a combined method for surface pasteurization of black pepper seeds. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 310-314.

Federación Española de Industrias de la Alimentación: Informe anual de 2018 de la federación española de industrias de la alimentación.

Fernandez, J., Reyes-Davo, E., Reyes-Canovas, R., Garcia-Sevilla, J., Vela-Carrascosa, E., & Jara Rico, A. (2015). Heating cell, heater using same, heating system and use thereof. ES2568749; PCT/ES,107 70712, 2015.

Frank Kreith & Mark S. Bohn (2001), Principio de Transferencia de calor. Thomson Editores. ISBN 84-9732-061-1

González-Monroy, A. D., Rodríguez-Hernández, G., Ozuna, C., & Sosa-Morales, M. E. (2018). Microwave-assisted pasteurization of beverages (tamarind and green) and their quality during refrigerated storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 51-57.

Gupta, M., & Leong, E. W. W. (2008). *Microwaves and metals*. John Wiley & Sons.

Hayes, P. R., & Sanz Perez, B. E. R. N. A. B. E. (1993). *Microbiología e higiene de los alimentos*

Heredia, A., Peinado, I., Rosa, E., & Andrés, A. (2010). Effect of osmotic pre-treatment and microwave heating on lycopene degradation and isomerization in cherry tomato. *Food Chemistry*, 123(1), 92-98.

Horrungsiwat S., Therdthai N. & Ratphitagsanti W. (2016) Effect of combined microwave-hot air drying and superheated steam drying on physical and chemical properties of rice *International Journal of Food Science and Technology*, 51, 1851–1859

Instituto Nacional de Estadística (2017). Estadística Estructural de Empresas: Sector Industrial 2017. Recuperado de https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=estadistica_C&cid=1254736143952&menu=ultiDatos&idp=1254735576715

Instituto Nacional de Estadística (2018). PIB de España 2017. Recuperado de: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736167628&menu=resultados&idp=1254735576581#!tab-1254736158133

Instituto de Crédito Oficial (2020). Préstamos bonificados. Recuperado de <https://www.ico.es/web/ico/lineas-ico>

Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (2020) , Ayudas para empresas. Recuperado de: <https://www.ivace.es/index.php/es/ayudas/innovacion-e-i-d>

Jafari, H., Kalantari, D., & Azadbakht, M. (2018). Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying. *Energy*, 142, 647-654.

Jun S., Puri V. M., Fouling models for heat exchangers in dairy processing: a review, *Journal of Food Process Engineering* 28 (2004) 1–34.

Kirby, R. M., Bartram, J., & Carr, R. (2003). Water in food production and processing: Quantity and quality concerns. *Food Control*, 14(5), 283–299.

Kumar, A., Kuang, Y., Liang, Z., & Sun, X. (2020). Microwave Chemistry, Recent Advancements and Eco-Friendly Microwave-Assisted Synthesis of Nanoarchitectures and Their Applications: A Review. *Materials Today Nano*, 100076.

Le T. Q., Jittanit W. (2015) Optimization of operating process parameters for instant brown rice production with microwave-followed by convective hot air drying. *Journal of Stored Products Research*, 61, 1-8.

Levenspiel, O. (2014). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Reverté.

Li, G., Miles, N. J., Wu, T., & Hall, P. (2017). Large eddy simulation and Reynolds-averaged Navier–Stokes based modelling of geometrically induced swirl flows applied for the better understanding of Clean-In-Place procedures. *Food and Bioproducts Processing*, 104, 77-93.

Luan, D., Tang, J., Pedrow, P. D., Liu, F., & Tang, Z. (2015). Performance of mobile metallic temperature sensors in high power microwave heating systems. *Journal of food engineering*, 149, 114-122.

Makroo, H. A., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2020). Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*.

Malinowska-Pańczyk, E., Królik, K., Skorupska, K., Puta, M., Martysiak-Żurowska, D., & Kiełbratowska, B. (2019). Microwave heat treatment

application to pasteurization of human milk. *Innovative food science & emerging technologies*, 52, 42-48.

Menéndez, J.A., Moreno, A.H. (Eds.). (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*. Latacunga, Ecuador: Editorial Universidad Técnica de Cotopaxi, Primera Edición, pp 315. ISBN: 978-9978-395-34-9

Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*.

Ministerio de Ciencia e Innovación (2020), Convocatoria de ayudas. Recuperado de:

<https://www.ciencia.gob.es/portal/site/MICINN/menuitem.791459a43fdf738d70fd325001432ea0/?vgnnextoid=9214d1072606c610VgnVCM1000001d04140aRCRD&vgnnextchannel=b24e067c468a4610VgnVCM1000001d04140aRCRD&vgnnextfmt=formato2&id3=7114d1072606c610VgnVCM1000001d04140a>

Morata, A. (2010). Calentamiento Ohmico. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Morata, A. (2010). Deshidratación por fluidos supercríticos. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Morata, A. (2010). Ozonización. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Morata, A. (2010). Pulsos de luz. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Morata, A. (2010). Presiones Hidrostáticas Elevadas. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Morata, A. (2010). Radiaciones ionizantes. En: *Nuevas tecnologías de conservación de alimentos*. Madrid: Antonio Madrid Vicente, 16.

Mollaie, S., Sedighi, F., Habibi, B., Hazrati, S., & Asgharian, P. (2019). Extraction of essential oils of *Ferulago angulata* with microwave-assisted hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 137, 43-51.

Nelson, S. O. (2008). Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54(2), 104-112.

Ovissipour, M., Rasco, B., Tang, J., & Sablani, S. S. (2013). Kinetics of quality changes in whole blue mussel (*Mytilus edulis*) during pasteurization. *Food Research International*, 53(1), 141-148.

Pace, M., De Bonis, M. V., Marra, F., & Ruocco, G. (2011). Characterization of a combination oven prototype: Effects of microwave exposure and enhanced convection to local temperature rise in a moist substrate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(5), 557-564.

Pandiselvam, R., Kaavya, R., Jayanath, Y., Veenuttranon, K., Lueprasitsakul, P., Divya, V., ... & Ramesh, S. V. (2020). Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 38-54.

Peng, J., Tang, J., Luan, D., Liu, F., Tang, Z., Li, F., & Zhang, W. (2017). Microwave pasteurization of pre-packaged carrots. *Journal of Food Engineering*, 202, 56-64.

Pozar, D. M. (2009). *Microwave engineering*. John Wiley & Sons.

Raja, B. D., Jhala, R. L., & Patel, V. (2017). Many-objective optimization of shell and tube heat exchanger. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2, 87-101.

Resurreccion Jr, F. P., Tang, J., Pedrow, P., Cavalieri, R., Liu, F., & Tang, Z. (2013). Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system. *Journal of Food Engineering*, 118(4), 406-416.

Ruocco, G. (2018). Introduction to Transport Phenomena Modeling: A Multiphysics, General Equation-Based Approach. Springer.

Saeeduddin, M., Abid, M., Jabbar, S., Wu, T., Hashim, M. M., Awad, F. N., ... & Zeng, X. (2015). Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 452-458.

Sairem Sas (2020) Aplicaciones en la industria de alimentos.

Recuperado de <https://www.sairem.com/es/solutions-for-food-and-industry/rapid-cooking-of-food/#>

Salvi, D., Ortego, J., Arauz, C., Sabliov, C. M., & Boldor, D. (2009). Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating. *Journal of food engineering*, 93(2), 149-157

Selectra (2020), Tarifa Luz hora. Recuperado de:

<https://tarifaluzhora.es/>

Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons.

Siguemoto, É. S., Purgatto, E., Hassimotto, N. M., & Gut, J. A. (2019). Comparative evaluation of flavour and nutritional quality after conventional and microwave-assisted pasteurization of cloudy apple juice. *LWT*, 111, 853-860

Stratakos, A. C., Delgado-Pando, G., Linton, M., Patterson, M. F., & Koidis, A. (2016). Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food chemistry*, 190, 622-628.

Tang, J. (2015). Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality. *Journal of food science*, 80(8), E1776-E1793.

Torabi, M., Zhang, K., Karimi, N., & Peterson, G. P. (2016). Entropy generation in thermal systems with solid structures—a concise review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 917-931.

Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2007). Introducción a la microbiología. Ed. Médica Panamericana.

Tuta, S., & Palazoğlu, T. K. (2017). Finite element modeling of continuous-flow microwave heating of fluid foods and experimental validation. *Journal of food engineering*, 192, 79-92.

Unión Europea (2020) Estrategias y objetivos climáticos. Recuperado de https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es

Wittig de Penna, E. (2001). Evaluación sensorial: una metodología actual para tecnología de alimentos

Xie, X., & Lin, B. (2019). Understanding the energy intensity change in China's food industry: A comprehensive decomposition method. *Energy policy*, 129, 53-68.

Yadav, K., & Sircar, A. (2019). Application of low enthalpy geothermal fluid for space heating and cooling, honey processing and milk pasteurization. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100499.

Yarmand, M., Homayouni, A.R., 2011. Microwave processing of meat. In: Usha Chandra, Dr (Ed.), *Microwave Heating*. ISBN: 978-953-307-573-0, InTech,

Zhang, W., Liu, F., Nindo, C., & Tang, J. (2013). Physical properties of egg whites and whole eggs relevant to microwave pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 118(1), 62-69.

2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis y Objetivos

Las formas de calentamiento de fluidos más comunes en la industria agroalimentaria están basadas en combustibles fósiles. No se ha implantado a gran escala una alternativa que pueda considerarse a la vez sostenible (libre de emisiones de GEI y que pueda ser alimentada por energías renovables) y competitiva en precio. La hipótesis de la presente tesis es que la Célula Básica de Transferencia de Energía (CBTE) podría ser esa alternativa. Además, la hipótesis propone que la tecnología CBTE se puede implantar en equipos a escala industrial de forma satisfactoria, es decir, que es escalable.

Para evaluar esta hipótesis, se diseñó un proyecto multidisciplinar de investigación industrial que aunaba los conocimientos en las diversas áreas que cubre la tecnología CBTE. Estas áreas son tecnología de alimentos, microondas y cerámicas. El proyecto llevaba por título “Desarrollo de maquinaria de bajo consumo y 0 emisiones utilizando células calefactoras por microondas para procesos de pasteurización de leche y zumo”. El proyecto solicitó y fue beneficiado por las ayudas para la formación de doctores en empresas “Doctorados Industriales” en la anualidad 2016.

La principal meta del proyecto y de la tesis era la de desarrollar un equipamiento industrial (o en esta etapa, su prototipo), que, funcionando alimentado por electricidad, sea competitivo en costes energéticos con las tecnologías actuales de calentamiento de fluidos basadas en intercambiadores de calor. Para lograrlo, se realizaron tres preguntas que dieron lugar a tres etapas de investigación.

Pregunta de investigación 1: ¿Cuál es la composición cerámica óptima de una CBTE para la función de calentar fluidos?

Para responder a esta pregunta se fijaron los siguientes objetivos específicos:

- Establecer la base cerámica ideal a la que se le pudiera incluir distintas proporciones de susceptor de microondas sin que se fracture al ser calentada.
- Hallar la proporción óptima de susceptor para que la cerámica se caliente lo más rápido posible al ser iluminada por energía de microondas, y posteriormente, retenga el calor el máximo tiempo posible.

- Validar las composiciones más prometedoras para el calentamiento de un fluido con un pequeño aumento de temperatura: aire.

Los resultados se exponen en el capítulo 1.

Pregunta de investigación 2: ¿Puede la tecnología CBTE calentar líquidos a temperaturas de pasteurización?

Para responder a esta pregunta se fijaron los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir un prototipo de calentador de fluidos con tecnología CBTE a escala de laboratorio
- Caracterizar el prototipo bajo distintas condiciones: potencia aplicada, fluido a calentar, tiempo de proceso y temperatura inicial de la placa.
- Validar si se alcanzan las temperaturas necesarias para los procesos objetivo.
- Calcular la eficiencia energética del prototipo.

Los resultados se exponen en el capítulo 2.

Pregunta de investigación 3: ¿Cuál es el potencial de la tecnología CBTE?

Para responder a esta pregunta se fijaron los siguientes objetivos específicos:

- Simular las condiciones ideales de la tecnología CBTE mediante software especializado.
- Optimizar el prototipo mediante la simulación, evaluando alternativas tales como superficies de contacto modificadas u otras posibilidades de circulación del fluido.
- Evaluar el aumento de eficiencia energética que ofrecería el prototipo optimizado o sus beneficios.
- Modelizar su aplicación en distintos fluidos alimentarios.
- Analizar y optimizar la entropía generada en esta tecnología.

Los resultados se exponen en los capítulos 3 y 4.

3 RESULTADOS

Resultados

CAPÍTULO 1:

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL MATERIAL CERÁMICO

Pregunta de investigación 1: ¿Cuál es la composición cerámica óptima de una CBTE para la función de calentar fluidos?

El plan de negocio realizado sobre el calefactor CBTE, producto de este estudio ha dado como resultado un sello de excelencia H2020.

ABSTRACT

The work of this chapter began with the search for an optimal microwave susceptor ratio to implement in a ceramic matrix. This composition is the basis for a new, more efficient heater, based on BCET technology. The viable compositions considering consistency and conformation were placed in a microwave oven equipped with an optical pyrometer. The time required to increase and decrease its temperature was measured. The final susceptor content, which was used for the new heater, was calculated from these data.

After prototyping the heater, the potential energy saves were estimated. The air temperature in a 338L volume chamber was increased with a ceramic heater using electric resistors and subsequently with the new doped ceramic heater. Consumption and time measurements were made to increase the air temperature inside the chamber by 10 °C. BCET heater needed 40% less energy for that increase of air's temperature.

Key words: Ceramic, heater, microwave, susceptor

RESUMEN

El trabajo contemplado en este capítulo comenzó con la búsqueda de una proporción óptima de susceptor de microondas, para implementar en una matriz cerámica. Las composiciones viables a nivel de consistencia y conformación se calentaron en un horno microondas con un pirómetro óptico. Se midió el tiempo requerido para aumentar y disminuir su temperatura. El contenido del susceptor, que se utilizó para el nuevo calefactor, se calculó a partir de estos datos.

Se fabricó un prototipo del calefactor y se estimó el ahorro energético potencial comparado con tecnologías convencionales. Para ello se aumentó la temperatura del aire en una cámara aislada de 338L con una cerámica calentada usando resistencias eléctricas y posteriormente con el nuevo calefactor de cerámica dopada. Se midió el consumo y el tiempo que necesitan para aumentar 10 °C la temperatura del aire. El calefactor basado en tecnología CBTE requirió un 40% menos de energía para dicho aumento de temperatura.

Palabras clave: Cerámica, calefactor, microondas, susceptor

INTRODUCTION

El esfuerzo por hacer un uso lo más eficiente posible de la energía que el ser humano tiene a su disposición, lleva dándose desde los orígenes de la civilización. Originalmente era por razones puramente económicas, hasta que comenzó a aparecer también una razón de respeto por el medioambiente en el protocolo de Montreal (United Nations, 1988) en 1988 y se confirmó la tendencia con el protocolo de Kyoto en 1997 (United Nations, 1997). La razón medioambiental ha ido ganando peso desde entonces, con el paso de los años, hasta el punto de que se hace necesaria la búsqueda de alternativas de origen eléctrico y/o renovable al uso del gas o combustibles fósiles, aunque la razón económica no ha perdido su importancia y sigue tan vigente como al principio.

Las tecnologías de origen puramente eléctrico (resistencias), son una opción viable a pequeña escala, sin embargo, el coste de la energía eléctrica respecto al gas, que es aproximadamente el triple, la hacen todavía inabordable a escala industrial, y poco rentable a nivel doméstico. Una de las tecnologías que está intentando mejorar la eficiencia energética en procesos de calentamiento, es la aplicación de energía de microondas (generada a partir de energía eléctrica) a materiales cerámicos específicos con el fin de optimizar su inercia térmica. En este sentido, los materiales cerámicos tienen numerosas aplicaciones que aprovechan sus características típicas (bajas conductividades eléctricas y térmicas) (Carter & Norton, 2007), pero la gran mayoría de formulaciones cerámicas, sobre todo las más convencionales, no absorben la energía de microondas, y por tanto, no se pueden calentar por este método. Sin embargo, la inclusión de materiales susceptores de microondas (materiales que facilitan la absorción de microondas de forma muy eficiente energéticamente), permite que los materiales cerámicos sí que absorban energía de microondas (Bhattacharya & Basak, 2016). Los susceptores más típicos que tienen posibilidad de integrarse en composiciones cerámicas son el grafito (capas de carbono), el carburo de silicio (SiC), y el Zirconio (Zr) (Al-Gaashani et al., 2018). Este tipo de materiales son los considerados como Advanced Materials for Microwave Heating (AM²H). Diversos autores han caracterizado muchas de las propiedades de los compuestos susceptores una vez implementados en formulaciones cerámicas, como su dureza, microestructura o

rugosidad de la superficie (Qu et al., 2019). Las formulaciones cerámicas que incluyen esos susceptores, tienen, además, numerosas aplicaciones, no sólo para el calentamiento, como, por ejemplo, amortiguadores de la vibración en rodamientos (Murzin & Balyakin, 2017).

Las aplicaciones de calentamiento por microondas a materiales cerámicos con susceptores han sido objeto de algunos estudios. Una parte de ellos caracteriza el calentamiento (Wang et al., 2012), y otros le dan aplicaciones tales como síntesis (Alweendo et al., 2019) o calcinación (Sun et al., 2019). Pero todos ellos realizan el calentamiento mediante microondas radiadas, en cavidad cerrada. La CBTE (Fernandez et al., 2015), cuyo principio de funcionamiento se ha descrito en la introducción, es un sistema innovador porque emite energía de microondas de forma conducida. Por lo tanto, la alimentación de la celda (o conjunto de celdas) CBTE se realiza sin necesidad de confinarla en una cavidad cerrada, por lo que es capaz de mantener contacto directo con el aire u otros fluidos, de manera totalmente segura, ya que la energía se disipa completamente en el material cerámico aumentando su temperatura sin que se pueda producir ningún tipo de fuga de microondas al exterior de la celda. Esto es importante para conseguir las autorizaciones pertinentes para el funcionamiento de un equipo relacionado con la tecnología de microondas (Directiva 2004/108/CE), pero también abre un abanico de muchísimas posibilidades con estos materiales que antes eran técnicamente imposibles.

Mediante la experimentación que se expone en este capítulo se pretende dar a la tecnología CBTE una amplia aplicación como calentador de fluidos. Por ello, tiene sentido que el primer fluido que ha sido seleccionado para calentar sea aire, es decir, que funcione como un calefactor que pueda calentar una cámara/túnel de fermentación o estancias interiores a nivel doméstico. Además, el aire es una sustancia que no puede calentarse de forma directa por microondas, por lo que abre una nueva vía de calentamiento para este fluido, evitando su calentamiento mediante quemadores de gas, que generan y emiten gran cantidad de CO₂ a la atmósfera. Se ha decidido comenzar con la aplicación concreta de calefacción, ya que no precisa de un aumento de temperaturas excesivo (la temperatura de confort está entre 21 y 26 °C, y, si la estancia a calentar tiene un

aislamiento adecuado, rara vez requiere un incremento de más de 10°C para alcanzarla).

El objetivo de este capítulo fue optimizar la composición cerámica a integrar en la tecnología CBTE, como material en el que se disipa toda la energía de la onda electromagnética, aumentando su temperatura. Para ello se ha evaluado el comportamiento frente a la radiación de microondas (calentamiento) y el posterior enfriamiento de diferentes composiciones cerámicas. Dichas composiciones mezclan componentes cerámicos típicos con sustancias susceptibles, para aumentar su velocidad de calentamiento dieléctrico, con el fin de obtener un material optimizado para ser implementado en un calefactor dieléctrico cerámico.

MATERIALES Y EXPERIMENTAL

Se preparó una mezcla de materias primas cerámicas a la que se añadieron distintas proporciones de material susceptible (entre 25 y 90.1 %). La empresa ha decidido mantener la composición concreta de dichas mezclas en secreto, pero es de interés para este capítulo remarcar que las composiciones de estas mezclas fueron elegidas para desarrollar, después de la cocción, materiales cerámicos de diferente expansión térmica y para probar su compatibilidad en términos de expansión y reactividad con el material susceptible. Se consideraron compatibles si no se rompen o burbujean después de la cocción.

El segundo paso fue escoger el susceptible a implementar en la mezcla cerámica. Se consideraron carbono (C), carburo de silicio (SiC) y carburo de zirconio (ZrC).

El procedimiento de obtención de las distintas composiciones cerámicas (base + material susceptible) fue el siguiente:

1. Homogeneización de la mezcla mediante molienda en húmedo en un molino de jarras.
2. Secado en horno de laboratorio, para obtener un material homogéneo en polvo, hasta un contenido en humedad final del 6%.
3. Molienda y granulación del polvo obtenido en el paso anterior, con el fin de prepararlo para ser prensado. Los tamaños de partícula se mantuvieron confidenciales.
4. Prensado uniaxial a 40 MPa de las piezas resultantes, de 80x30x6 mm.
5. Cocción de cada una de las piezas resultantes, en un horno eléctrico de alta temperatura (hasta 1300 °C) (Hornos del Vallés, Cerdanyola del Vallés, España) a diferentes ciclos térmicos. Para cada composición se realizaron tres cocciones distintas, seleccionando como óptimo el ciclo de cocción que generase la estructura con menor porosidad. La empresa ha decidido mantener en secreto el número y temperatura de los ciclos de cocción realizados, aunque sí permite especificar que la temperatura de cocción en su punto máximo oscila entre 1050 y 1300 °C

Las piezas resultantes obtenidas se denominaron probetas, nomenclatura que será utilizada en los siguientes apartados para

referirnos a las piezas cerámicas prensadas y cocidas a alta temperatura.

Caracterización de las probetas

En primer lugar, las probetas se caracterizaron a nivel fisicoquímico, para poder seleccionar aquellas que presentaran una estructura más propicia para el calentamiento. Para ello se midió la densidad por el método de Arquímedes antes y después de los ciclos de cocción en el horno de alta temperatura.

Para cada composición, se midió la respuesta a la energía de microondas monitorizando la temperatura de la muestra mediante un pirómetro óptico (Optris, Berlín, Alemania) conectado a un software llamado CompactConnect proporcionado por la misma compañía, que registraba la temperatura y el tiempo de calentamiento, y de enfriamiento de cada una de las piezas. El software ofrece la posibilidad de grabar largos periodos de tiempo y de analizar el calentamiento en tiempo real, ofreciendo gráficas de tiempo (medido en segundos, ubicado en el eje x) frente a temperatura (medido en °C, ubicado en el eje y).

Las probetas se calentaron en un horno microondas en el que su potencia emitida real fue calculada con el test 2L (Buffler, 1991). El test 2L consiste en introducir 2 L de agua en la cavidad de microondas, y calentar dicha cantidad de agua durante 120 segundos. Se considera una masa suficiente para que sea capaz de absorber toda la potencia de microondas emitida. Al ser la masa y el calor específico del agua conocidos, midiendo el incremento de temperatura se puede conocer la potencia real que está emitiendo el microondas, y que, en ocasiones, difiere de la nominal.

Se realizaron pruebas de calentamiento por triplicado a cada una de las composiciones cerámicas, excluyendo valores anómalos (significativamente diferentes) cuando se dio el caso. El análisis estadístico de los resultados se llevó a cabo con el programa Statgraphics Centurion XVII.II (Royal Technologies, Hudsonville, USA).

Cada experimento constó de una fase de calentamiento rápido, en la que se aportó energía de microondas al sistema y una de enfriamiento, más lento, en el que no se aportó energía al sistema y este se libera al aire debido a la diferencia de temperatura con el

ambiente. A continuación, se detalla el ciclo realizado a cada una de las composiciones consideradas como viables estructuralmente:

- Atemperado de todas las probetas a 24 °C como temperatura fijada de partida
- Calentamiento mediante radiación de energía de microondas hasta alcanzar la temperatura de 300 °C (registrando el tiempo necesario para alcanzar esta temperatura).
- Enfriamiento de las probetas a temperatura ambiente (24°C) hasta alcanzar 100 °C (registrando el tiempo para alcanzar esta temperatura).

Variables de optimización

Dado que hay muchas variables a tener en cuenta, se seleccionó la relación entre el tiempo de enfriamiento y el tiempo de calentamiento como parámetro de optimización principal del material cerámico. Este parámetro marcará la composición idónea para la aplicación de calefacción de aire, definiéndose como el coeficiente α , (ecuación 1)

$$\alpha = \frac{t_{300}}{t_{100}} \quad (1)$$

Donde t_{300} es el tiempo (s) que la probeta necesita para alcanzar 300 °C y t_{100} es el tiempo (s) que la probeta requiere para enfriarse desde 300 °C a 100 °C.

A las dos composiciones con mejor α se les realizó un análisis más completo para caracterizar su respuesta al calentamiento por microondas, tanto en temperatura máxima alcanzada como en la temperatura media y distribución de temperaturas en su superficie. Para ellos se modificó un horno microondas de 1000 w de potencia máxima teórica (Sammic, Valencia, España) para incorporar en él una cámara termográfica Optris PI 160 (Optris, Berlín, Alemania) para el registro de temperaturas en tiempo real, midiendo la temperatura media de la superficie de la placa, y la temperatura en el punto más caliente de esta. El horno de microondas modificado está cubierto únicamente por una placa metálica perforada que actúa como una

jaula de Faraday, pero permite pasar parte del espectro visible e infrarrojo (Figura 1.1). La cámara compara los valores obtenidos a través de la jaula de Faraday con los valores reales al abrir la puerta del microondas y exponerla directamente a la cámara.



Figura 1.1. Horno microondas con cámara termográfica acoplada

Análisis de la eficiencia energética

Para comparar la tecnología CBTE para calentamiento de la cerámica con microondas con una tecnología convencional en condiciones similares, se construyó un calefactor de cerámica calentado por resistencias eléctricas (figura 1.2) (efecto Joule). El sistema en el que se ha integrado el calefactor basado en tecnología CBTE consta de los componentes mencionados y distribuidos como se muestran en la Figura 1.3

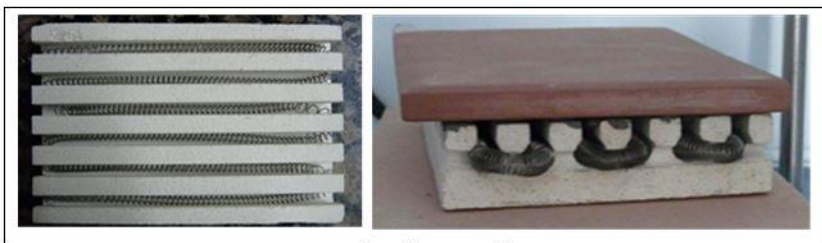


Figura 1.2. Calefactor cerámico con resistencia eléctrica

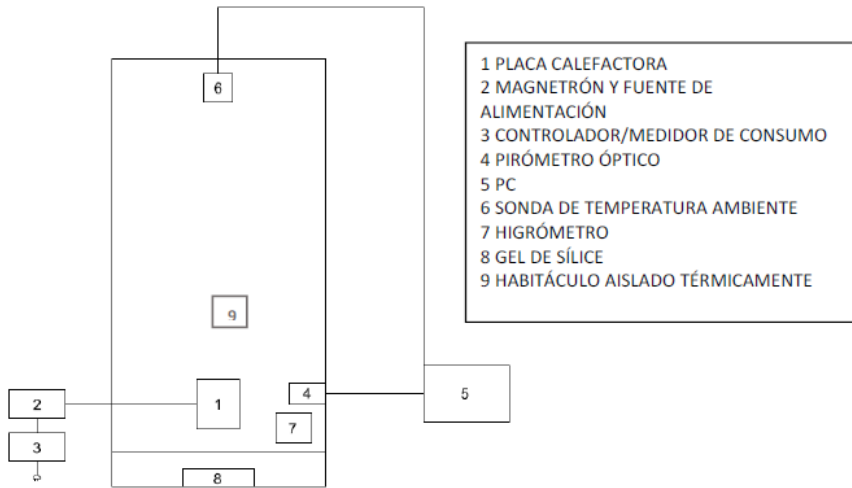


Figura 1.3 Diagrama del calefactor basado en microondas

Tanto el calefactor cerámico convencional, como el que se construyó con tecnología CBTE fueron alimentados con la misma potencia, de 300 W, y expuestos a condiciones idénticas para comparar los resultados. Se confinaron en una cámara hermética con un volumen conocido de aire de 338 L. La temperatura de la superficie de la cerámica fue monitorizada mediante el pirómetro y el software anteriormente definidos, mientras que la temperatura del aire en la cámara fue medida con dos termómetros ambientales, en la parte alta y la parte baja de la cámara, respectivamente. La humedad del aire se mantuvo constante al 10% colocando un recipiente con silicagel en la cámara y controlándose con un higrómetro.

La eficiencia energética (EA) de cada uno de los calefactores fue calculada mediante la ecuación 4, que define la proporción de la energía emitida por el calefactor (E_1) (Julios) calculada en la ecuación 2, en la que P es la potencia (W) a la que funcionaba el equipo, y t (s), el tiempo que ha estado encendido, que era absorbida por el aire (E_2) (Julios) calculada en la ecuación 3, en la que m es la masa del aire (kg) calculada a partir de volumen y densidad, c_p su calor específico (J/kgK), y ΔT su incremento de temperatura (K).

$$E_1 = P \cdot t \quad (2)$$

Resultados

$$E_2 = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$EA = \frac{E_2}{E_1} \cdot 100 \quad (4)$$

RESULTADOS

Selección del susceptor y composición óptima de la base cerámica

El susceptor elegido fue el carburo de silicio (SiC), ya que se calienta por microondas de forma óptima en los rangos de temperatura objetivos (desde 0 hasta temperaturas algo superiores a los 1000 °C) y presenta una estructura resistente, mientras que el carbono podía sufrir reacciones químicas cuando se expone a las temperaturas de cocción de la cerámica, y el carburo de zirconio tiene un precio mucho mayor debido a que se puede calentar en rangos de temperatura mucho más altos (de más de 1600 °C), que no son útiles en estas aplicaciones. Estudios anteriores de Peng et al (2013), evaluaron la inclusión de otros susceptores como Al_2O_3 en capas comparando la capacidad de absorción con una pieza de SiC puro, observando que el calentamiento de la cerámica era, como máximo, de la mitad que para el SiC puro.

Se probaron distintas bases de materiales cerámicos que están presentes de forma habitual en formulaciones convencionales, tales como cordierita, talco, arcillas, caolín o gres, en distintas proporciones, hasta un total de 80 combinaciones, para que formaran parte del material cerámico que compondría la CBTE. Finalmente, se consiguió un material fiable, de una densidad y consistencia aceptables. La composición final se mantiene como confidencial por solicitud de la empresa proveedora de pastas cerámicas, en cuyas instalaciones se realizó la mayor parte de este apartado. La Figura 1.4 muestra un ejemplo de una probeta con composición satisfactoria y una insatisfactoria, ya que, en el momento de cocción, se produjeron burbujeros, lo cual lleva a un exceso de porosidad que provocó que no mantuviera su integridad.

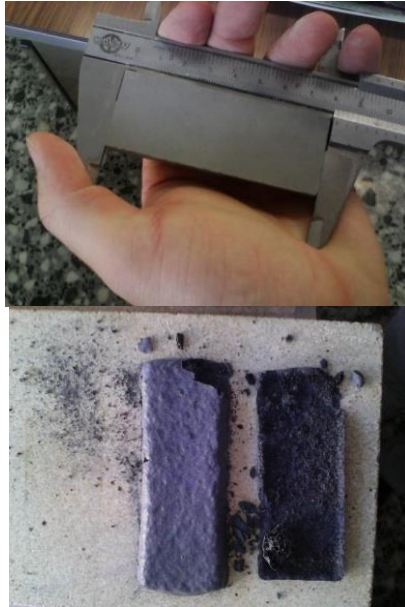


Figura 1.4: ejemplo de una probeta válida (arriba), y de una fallida (abajo)

Proporción óptima de susceptor

La elección de la composición cerámica se realizó bajo los criterios de rapidez de calentamiento por microondas y capacidad de retención del calor generado al recibir radiación de microondas. Las probetas con base óptima se clasificaron según la proporción de susceptor integrado en la probeta y su temperatura de sinterización. Una vez cocidas, se midió su densidad, y se realizaron pruebas de calentamiento/enfriamiento para determinar el coeficiente α , que es la principal variable a tener en cuenta en su elección. La Figura 1.5 muestra un ejemplo de la evolución de la temperatura durante el calentamiento y enfriamiento en tres probetas, concretamente en la codificada como 40. Los resultados obtenidos para todas las combinaciones analizadas se muestran en la tabla 1.1. Cuanto más bajo sea el coeficiente α , mejor para funcionar como calentador y aprovechar las ventajas de la tecnología.

Resultados

Tabla 1.1 Características de las composiciones analizadas (densidad aparente (kg/m^3)), t (s) en alcanzar 300°C (t_{300}), t enfriarse (s) hasta 100°C (t_{100}) y coeficiente α) en función del % de susceptor y T de sinterización ($^\circ\text{C}$)

Probeta	Susceptor (%)	T Sinter. ($^\circ\text{C}$)	Dens. aparente (kg/m^3)	t_{300} (s)	t_{100} (s)	α
30	33.3	1270	2145±33 ^{ABb}	91±27 ^{Bbc}	287±107 ^{Bbc}	0.27±0.06 ^{Aabc}
31	25	1200	2140±27 ^{ABa}	154±49 ^{Ac}	466±98 ^{Ac}	0.31±0.08 ^{Bc}
32	50	1270	2179±41 ^{Cb}	50±21 ^{Cbc}	279±65 ^{BCbc}	0.19±0.01 ^{Cabc}
33	25	1270	2108±38 ^{ABb}	103±39 ^{Abc}	300±106 ^{Abc}	0.29±0.04 ^{Babc}
39	33.3	1200	2087±36 ^{ABa}	111±36 ^{Bc}	251±49 ^{Bc}	0.38±0.02 ^{Ac}
40	33.3	1250	2100±29 ^{ABb}	79±21 ^{Ba}	215±35 ^{Bab}	0.34±0.01 ^{Aa}
41	50	1200	2208±40 ^{Ca}	39±14 ^{Cc}	178±61 ^{BCc}	0.212±0.005 ^{Cc}
42	66.7	1200	2163±61 ^{Ca}	31±12 ^{Cc}	169±63 ^{Cc}	0.22±0.03 ^{Cc}
43	66.7	1250	2209±52 ^{Cb}	26±4 ^{Ca}	166±48 ^{Cab}	0.15±0.02 ^{Ca}
44	50	1060	2301±21 ^{Ca}	37±10 ^{Ca}	164±56 ^{BCa}	0.196±0.009 ^{Cbc}
45	50	1100	2213±39 ^{Cb}	32±6 ^{Cab}	184±66 ^{BCabc}	0.17±0.01 ^{Cab}
46	50	1250	2211±50 ^{Cb}	26±9 ^{Ca}	166±31 ^{BCab}	0.16±0.02 ^{Ca}
47	66.7	1060	2251±42 ^{Ca}	30±12 ^{Ca}	162±44 ^{Ca}	0.18±0.02 ^{Cbc}
48	66.7	1270	2287±24 ^{Cb}	37±5 ^{Cbc}	173±19 ^{Cbc}	0.191±0.004 ^{Cabc}
49	90.1	1060	2051±53 ^{BCa}	41±19 ^{Ca}	190±25 ^{BCa}	0.193±0.07 ^{Cbc}
50	90.1	1250	2098±61 ^{BCb}	32±11 ^{Ca}	210±36 ^{BCab}	0.15±0.01 ^{Ca}
51	86.2	1060	2027±22 ^{Aa}	33±8 ^{Ca}	189±39 ^{BCa}	0.184±0.002 ^{Cbc}
52	86.2	1250	2066±37 ^{Ab}	34±6 ^{Ca}	236±21 ^{BCab}	0.14±0.01 ^{Ca}

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras por efecto de la proporción de susceptor (mayúsculas) y por efecto de la temperatura de sinterización (minúsculas)

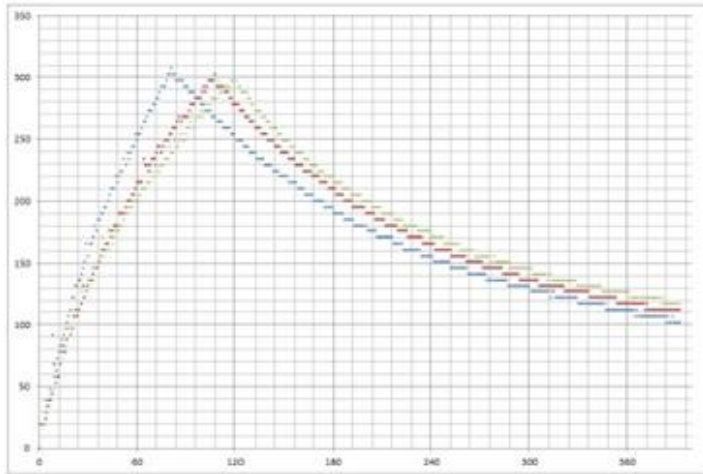


Figura 1.5 Ejemplo de la evolución de temperatura de la probeta 40 en sus tres repeticiones

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente mediante un ANOVA multifactorial, con el objetivo de evaluar la influencia de la proporción de susceptor y la temperatura de sinterización en las diversas variables (densidad aparente, tiempos de calentamiento y enfriamiento, y el coeficiente α).

Como puede observarse, la densidad de las piezas varía tanto por efecto de la composición como por efecto de la temperatura de sinterización. Así, los F-ratio del anova multifactorial para esta variable, son muy similares (8% para la proporción de susceptor y 11% para la temperatura), indicando que existe una relación muy estrecha entre ambos factores. Este hecho estaría relacionado con la conformación espacial de los cristales sinterizados en el material cerámico, a partir de los diferentes componentes químicos de las materias primas. Esta conformación depende tanto de su proporción en la mezcla como de la temperatura de cocción.

En relación al tiempo necesario para alcanzar los 300°C, a mayor proporción de susceptor disminuye este tiempo, pero a partir de concentraciones superiores al 50% el aumento no influye significativamente en la reducción del tiempo. La temperatura de sinterización influye mucho menos sobre este factor, con diferencias significativas muy pequeñas. Por el contrario, el tiempo de

enfriamiento es mayor cuanto menor es la proporción de susceptor. Esto está relacionado con la capacidad de retención del calor por parte de los componentes de la base cerámica, en mayor proporción cuanto menor es la proporción de susceptor. Además, la menor densidad de estas muestras, y por tanto, el mayor contenido en aire, favorecería la retención del calor.

Con todo ello, el factor a , aumenta a medida que aumenta la proporción de susceptor hasta valores de este del 50%. A valores mayores, no se encontraron diferencias significativas en el coeficiente. Aquí también, el principal factor que influye sobre la variación de a es la proporción de susceptor, mientras que la temperatura de cocción tiene una influencia baja.

En base a estos resultados, se seleccionaron las composiciones 46 (que se codificará como MBT01) y la 43 (codificada como MBT02) para el desarrollo de la célula CBTE.

Análisis termográfico del calentamiento por microondas de MBT01 y MBT02.

Antes de analizar la respuesta de las composiciones cerámicas a la energía de microondas, calentándolas en el horno de microondas modificado, este equipo debía caracterizarse para cuantificar la potencia real que se estaba aplicando. Para ello se realizó en el horno microondas el test 2-L según se ha descrito en el apartado "2.1 Caracterización de las probetas" de Materiales y Métodos, determinándose que la potencia útil del equipo era de 860 W, mientras que la potencia nominal del horno era de 1000 W.

Una vez caracterizado el equipo de calentamiento, se dispusieron, dos pastillas, una de cada composición (MBT01 y MBT02) con una masa de 190 y 194 g respectivamente, lo que suponía una relación potencia/masa de 4.45 y 4.43 W/g cuando cada una de ellas (siempre en ensayos separados) se introducían en el horno microondas. Las dimensiones de las muestras fueron similares a las probetas analizadas en el punto anterior (80x30x6 mm).

Como las muestras se calentaron en un horno microondas multimodo, que no había sido adaptado específicamente para calentar estas cerámicas, el calentamiento no fue completamente homogéneo. La distribución de la temperatura y su evolución con el

Resultados

tiempo para cada composición se muestra en las imágenes termográficas tomadas durante los ensayos (Figuras 1.6 y 1.7). En ambos casos el calentamiento fue relativamente homogéneo, es decir, no se producen grandes cambios en la distribución de la temperatura, lo cual es positivo porque indica que no hay ningún componente extraño en la formulación de la cerámica que se active a una cierta temperatura y actúe como susceptible más allá del que ya se ha mencionado (SiC), el cual está distribuido homogéneamente y sin que existan puntos con mayor concentración. En caso contrario, podría observarse un fenómeno de thermal runaway, en el que la zona más caliente cambia sus propiedades dieléctricas, haciendo que sea más susceptible que el resto de la pieza (mejor absorbedor de energía de microondas) y acudiendo toda la energía a esa zona (Akkari et al., 2006). Por este motivo, para analizar la velocidad de calentamiento, se consideraron la temperatura media de toda la superficie de la placa (T_{med}), y la temperatura en su punto más caliente (T_{max}).

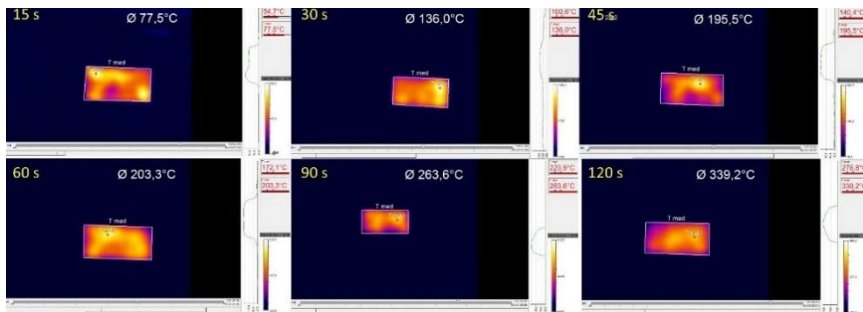


Figura 1.6 Secuencia de calentamiento MBT01

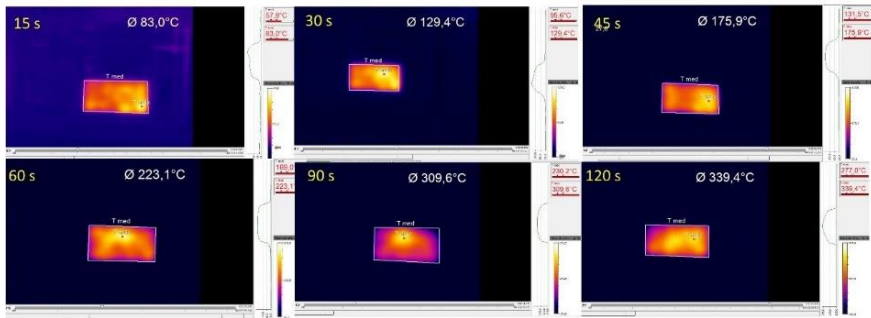


Figura 1.7 Secuencia de calentamiento MBT02

La Figura 1.8 muestra la variación de la temperatura con el tiempo, durante la fase de calentamiento, del punto más caliente y de la temperatura media de cada una de las muestras cerámicas (MBT01 y MBT02) analizadas. Como puede observarse, la variación de la temperatura con el tiempo puede ajustarse a un modelo polinómico de segundo orden en todos los casos. En la figura, también se observa que tanto la temperatura media como la máxima de ambas muestras a un determinado tiempo, son similares, sin observarse diferencias significativas entre las muestras. Por otro lado, si se observan diferencias entre la temperatura media y la máxima en una misma pieza, siendo este un aspecto negativo a considerar para la aplicación objetivo de estas cerámicas (calentamiento de fluidos). Estas diferencias podrían producir heterogeneidad de calentamiento, mientras que se busca que el calentamiento sea lo más homogéneo posible en toda la superficie de la placa cerámica para que el calor se genere por igual y pueda transferirse homogéneamente al fluido. Este problema de falta de homogeneidad, se espera solucionarlo cuando las microondas se transmitan al material de forma conducida y no radiada.

A partir de los modelos polinómicos ajustados, se calculó la variación de la velocidad de calentamiento con el tiempo a partir de la primera derivada de dichos polinomios.

Resultados

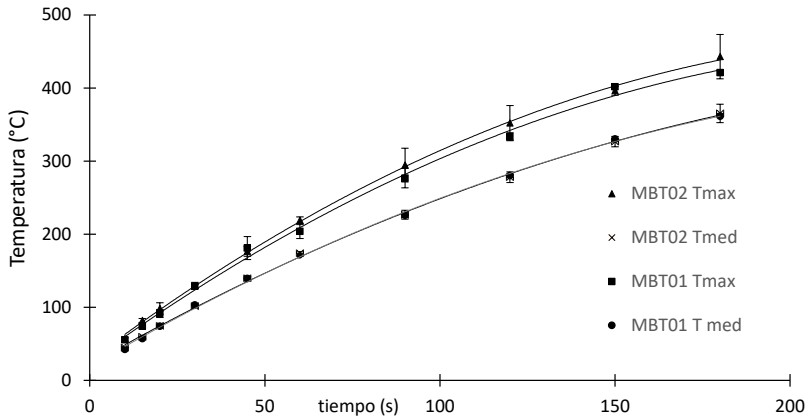


Figura 1.8 Evolución de la temperatura vs tiempo en las pruebas de calentamiento por microondas

La figura 1.9 muestra la evolución de la velocidad de calentamiento de las cerámicas con el tiempo. Al ser calculada como la derivada de un polinomio de segundo grado, sigue una evolución lineal, en este caso descendente, ya que la velocidad de calentamiento es cada vez menor. Esto podría explicarse porque durante este proceso de calentamiento intervienen dos fuerzas impulsoras. En primer lugar, el calentamiento por microondas, que es una fuerza impulsora que incrementa la temperatura y es constante en todo el periodo. En segundo lugar, una diferencia de temperatura entre la placa cerámica y la temperatura del ambiente, que es una fuerza impulsora que reduce la temperatura y que es mayor cuanto mayor es la temperatura de la placa, y causa el efecto de reducir la velocidad de calentamiento. Esto también explica que la velocidad de calentamiento en el punto más caliente se reduzca más rápido, ya que, al ser su temperatura mayor que la media, emite un flujo de calor mayor hacia el ambiente.

Resultados

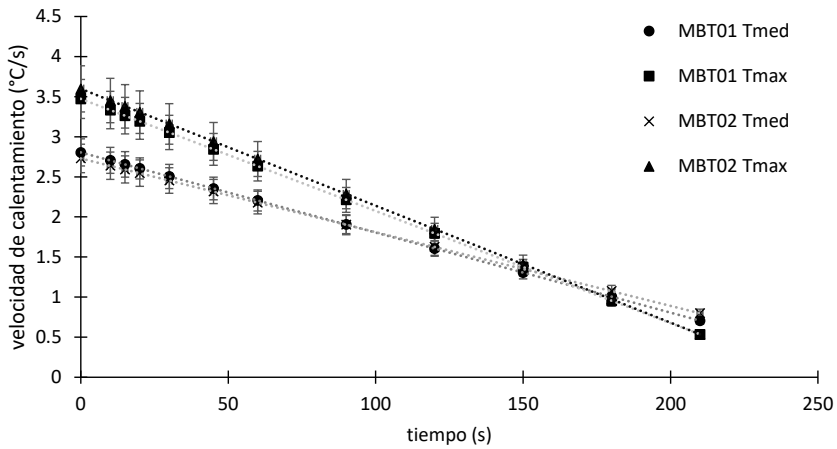


Figura 1.9 Evolución de la velocidad de calentamiento frente al tiempo

La Figura 1.10 muestra la evolución de la temperatura en el punto más caliente y la evolución de la temperatura media de ambas muestras al pasarlas a temperatura ambiente (24 °C), es decir, su enfriamiento, tras ser calentadas 210s en el mismo horno de microondas. placa. Como puede observarse, el comportamiento es similar en las dos muestras, enfriándose progresivamente, sin observarse diferencias significativas en la temperatura media de las dos muestras con el tiempo. Si que se observan diferencias en las temperaturas del punto más caliente, pero éstas son debidas a que la temperatura alcanzada durante el calentamiento fue mayor en la muestra MBT02. La variación de las temperaturas con el tiempo de enfriamiento se modelizó con polinomios de cuarto grado, calculándose la velocidad en cada punto con la derivada del polinomio ajustado.

Resultados

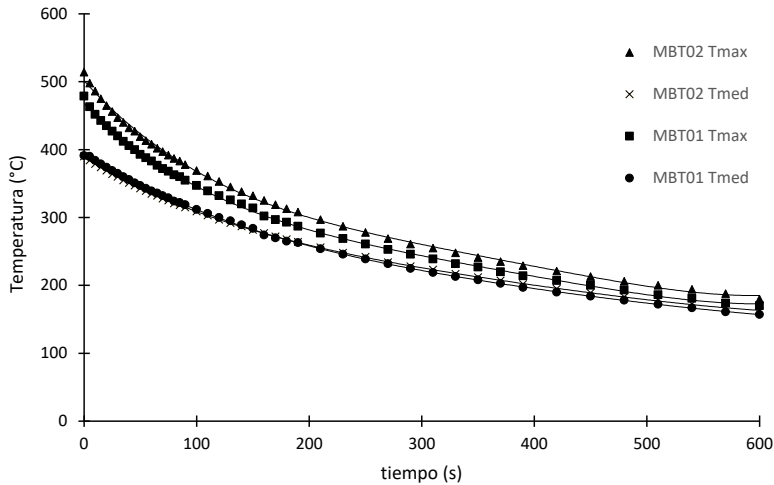


Figura 1.10 evolución de la temperatura con el tiempo de placas cerámicas MBT01 y MBT02.

Así, la figura 1.11 muestra la variación de la velocidad de enfriamiento de ambas composiciones cerámicas (MBT01 y MBT02 respectivamente). Como es lógico, la velocidad de enfriamiento es mayor al inicio del proceso, cuando existe mayor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la placa cerámica, y va decreciendo a medida que las temperaturas de la placa y del ambiente se van igualando. Por el mismo motivo, la velocidad de enfriamiento del punto más caliente es mayor que la de la temperatura media. Cabe destacar que se observa un incremento de la velocidad de enfriamiento en ambas temperaturas medias a partir de los 340 s. Esto puede deberse a que, hasta ese momento, tenían puntos a una temperatura mayor (Tmax), que conducían calor al resto de la muestra. Sin embargo, a partir de 340 s, el punto más caliente, al tener una velocidad de enfriamiento mayor, se ha enfriado y prácticamente homogeneizado con la temperatura del resto de la muestra, haciendo que está se enfríe sin obtener energía térmica de dichos puntos localizados.

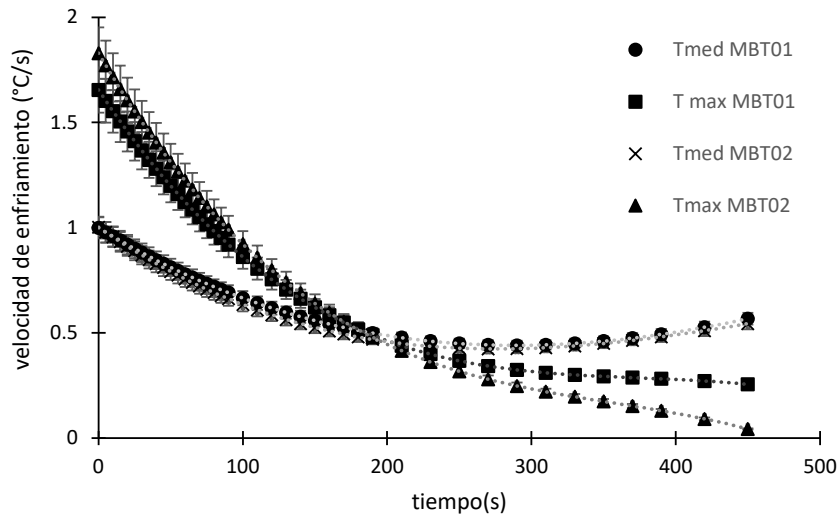


Figura 1.11 evolución de la velocidad de enfriamiento con el tiempo de placas cerámicas MBT01 y MBT02

Finalmente, MBT01 fue elegida como la composición más óptima debido a que al no encontrar diferencias significativas en cuanto a las velocidades de calentamiento y enfriamiento de su temperatura media, era una composición más sencilla y barata de hacer, pues contenía un 50% de susceptor frente al 66.6% de la MBT02, teniendo las dos la misma temperatura de sinterización (1250 °C).

En la línea de calentar mediante energía de microondas a cerámicas dopadas con SiC, Wei et al., (2018) produjeron cerámica porosa con SiC infiltrado mediante pirólisis, cociéndola a temperaturas ligeramente superiores a las utilizadas por este estudio (1350 °C) y en proporciones de hasta el 50% (similares a algunas de las consideradas por este estudio). Verificaron que la absorción de energía de microondas había aumentado un 70% respecto a la misma composición sin añadirle SiC, y de esta forma fueron capaces de calentarlas hasta 640 °C necesitando una potencia de 500 W (360 W inferior a la de este estudio). Esto da una idea de que, si se hubiera buscado alcanzar temperaturas superiores con la potencia empleada, habría sido posible, ya que en este estudio se empleó una menor relación de potencia/masa.

Las cerámicas dopadas por SiC también se han usado en algunas aplicaciones de calentamiento de alimentos. Así Basak & Rao (2010), llevaron a cabo una simulación sobre calentamiento de carne de cerdo mediante una placa de cerámica dopada con SiC concluyendo que teóricamente sería posible cocinar mediante este sistema. Sin embargo, la puesta en práctica de este sistema con un microondas doméstico (microondas radiadas) no resultó satisfactoria debido a la falta de homogeneidad en la distribución de campo en este tipo de equipos.

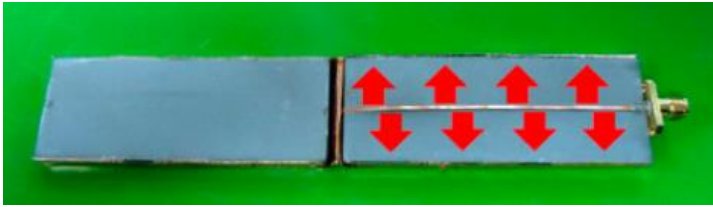
En resumen, la utilización de cerámicas dopadas alimentadas por energía de microondas abre un amplio campo de estudio, tanto en la búsqueda y mejora de los materiales susceptores como de los sistemas de aplicación de la energía para que ésta se distribuya homogéneamente o con un patrón previamente definido.

Fabricación de un calefactor de 4 células CBTE

El material cerámico optimizado se implementó en un calefactor de aire, con el objetivo de compararlo con las tecnologías convencionales. Cada una de las células básicas que integraban el calefactor desarrollado constaba de dos probetas de cerámica de la composición MBT01 (figura 1.12 (a)) que se colocaron una encima de la otra con un espacio entre ellas de las dimensiones de una tira de material metálico capaz de conducir energía de microondas tal como se muestra en la figura 1.12 (b). Esta tira conduce la energía de microondas, hasta la cerámica, y se disipan en esta, provocando un rápido aumento de la temperatura de las dos probetas. Se colocaron dos láminas de cobre encima y debajo de la cerámica para garantizar la estructura de la línea de banda y evitar fugas de microondas, pero al mismo tiempo asegurar una conducción suficiente del calor generado (Fernandez et al., 2015), adquiriendo la apariencia final de cada célula unitaria la mostrada en la figura 1.12 (c). Todo este conjunto de elementos se llamará celda de ahora en adelante, y es, en esencia, la unidad más básica de la tecnología CBTE.



(a)



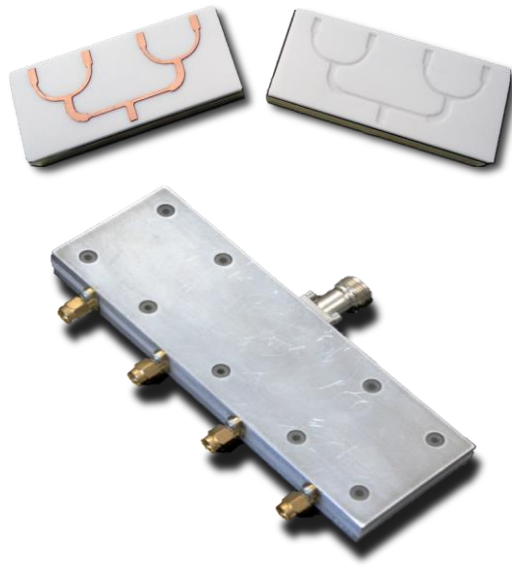
(b)



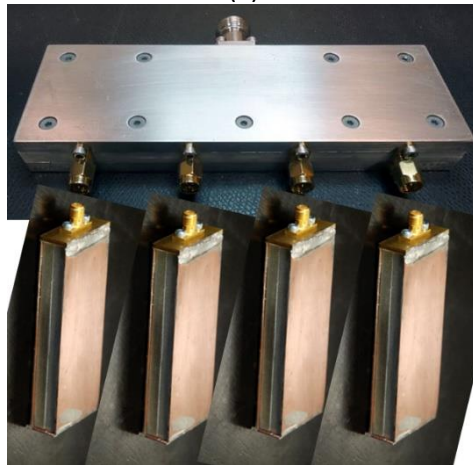
(c)

Figura 1.12 Célula básica de transferencia de energía. (a) cerámicas usadas para una célula (b) disposición de tira de conductor en cada célula (c) apariencia final de una célula

El calentador estará compuesto por cuatro celdas, a las que se conduce energía de microondas, mediante un divisor de potencia, como se muestra en la figura 1.13. La estructura integrada de 4 celdas se alimentó con una fuente de microondas capaz de aplicar potencias de entre 300 y 1000 W, pero en todo momento se usó su mínima potencia, es decir 300 W. Esta potencia se divide en 4 partes iguales mediante el divisor y conduce a cada celda la cantidad justa de energía que puede absorber el material cerámico aumentando proporcionalmente su temperatura.



(a)



(b)

Figura 1.13 (a) interior y apariencia del divisor de potencia (b) montaje de 4 células alimentadas por el divisor de potencia

La estructura de 4 celdas (en adelante calefactor CBTE) se integró en un montaje cuyo objetivo era comparar esta nueva tecnología CBTE, con la tecnología de un calefactor cerámico convencional de origen

eléctrico (resistencias eléctricas). Para comparar ambos calefactores, se confinaron cada uno en una cámara de aire aislada de volumen conocido (338 L) en la que había un termómetro de aire en la parte más elevada de la cámara y uno en la parte baja de la cámara, así como un pirómetro para registrar la temperatura de la superficie de ambos calefactores.

Comparación de la CBTE con un calentador cerámico alimentado por resistencias

La comparación entre los dos calefactores (CBTE y eléctrico) se llevó a cabo calentando un volumen conocido de aire (338 L) por ambos sistemas en ensayos separados. El objetivo era calentar la temperatura del aire 10 °C, ya que suele ser el incremento máximo de temperatura requerido para alcanzar la temperatura de confort en sistemas de calefacción de viviendas, si el aislamiento de la estancia es adecuado. Para incrementar la temperatura del aire, se realizaron ciclos de encendido-apagado hasta que la temperatura del aire alcanzó 34°C medida en los dos termómetros ambientales. En ambos casos, se encendía el calefactor hasta incrementar la temperatura de su superficie hasta 95 °C, y posteriormente se desconectaba hasta que la superficie bajaba hasta 85 °C. Alcanzado este valor, se volvía a encender hasta llegar de nuevo a 95 °C. La figura 1.14 muestra la evolución de la temperatura de ambas placas con el tiempo, donde pueden observarse los ciclos de apagado-encendido del sistema para cada una de las tecnologías ensayadas. Además, se detalla la temperatura del aire de la cámara con el tiempo, siendo ésta similar en ambos casos. El tiempo necesario para alcanzar la temperatura operativa (95 °C) se ha marcado en la figura como A para la tecnología CBTE y B para el calefactor eléctrico mientras que A' y B' son ejemplos de los periodos habituales de encendido llevados a cabo durante la prueba respectivamente. Como puede observarse, existe una diferencia notable en el tiempo necesario para aumentar la temperatura con cada tecnología. El periodo denominado como A duró 83 segundos, mientras que el denominado como B, 1077s, lo que supone una reducción de más de un 90% utilizando la tecnología CBTE. Por otra parte, al comparar A'

Resultados

con B' se observa que cada periodo A' dura 25 s, mientras que cada periodo B' dura 210 segundos, con lo que el tiempo de encendido por ciclo se reduce notablemente.

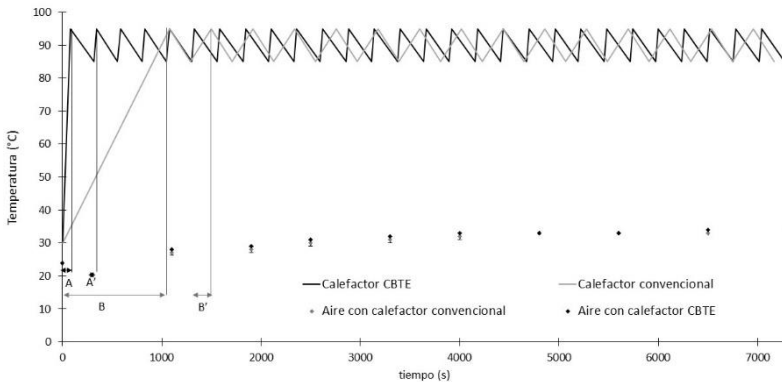


Figura 1.14 Evolución de la temperatura de los calefactores y del aire

La tabla 1.2 muestra los resultados promedio de las pruebas realizadas en la cámara con ambos calefactores (convencional y de microondas) en términos de tiempo total encendido (s), tiempo en el que 338 L de aire incrementan su temperatura 10 °C (s), tiempo de llegada a temperatura operativa (s), energía consumida hasta alcanzar temperatura operativa (Wh) y consumo de energía total (Wh). Se puede observar que el calefactor de microondas estuvo encendido aproximadamente el 10% del tiempo de la prueba aprovechándose su liberación lenta del calor, mientras que el calefactor cerámico convencional necesita estar activado aproximadamente el 28% del tiempo de la prueba, debido a que requiere 1077 segundos para aumentar su temperatura hasta el objetivo y posteriormente 230s para cada ciclo de encendido. Por tanto, con el calefactor CBTE puede reducirse hasta cerca de un 50% el consumo de energía. Además, estar encendido únicamente el 10% del tiempo podría ser interesante para combinar varios calefactores en diferentes habitaciones de la misma casa sin necesidad de aumentar la potencia contratada.

Tabla 1.2 Comparación del consumo de energía del calefactor eléctrico y del CBTE

Calefactor	Tiempo conectado (s)	Duración total de la prueba (s)	t de llegada a T operativa (s)	Energía en periodo de llegada	Consumo de energía (w-h)
Convencional	1426±76	7432±223	1077±32	8.6±0.6	97.9±3.0
CBTE	614±21	6219±187	83±2.2	1.2±0.01	51.2±3.3

Chen et al (2008), calentaron unas cerámicas que incluían carbono como susceptible hasta 850 °C, utilizando un horno convencional eléctrico y un horno de microondas doméstico. Comparando los dos sistemas de calentamiento de la cerámica, se obtuvieron reducciones del 20% en el consumo de energía utilizando microondas. En nuestro caso, comparando solo la fase de calentamiento de la cerámica, se han obtenido reducciones muy superiores, del orden del 88%.

Propuesta de lanzamiento al mercado como sistema de calefacción de aire

Habiendo observado y demostrado la eficiencia energética de un calefactor CBTE frente a uno convencional, desde la empresa se analizó la posibilidad de establecer una línea de negocio para su distribución y venta. Se analizaron las ventajas del dispositivo y se propuso el primer tipo de clientes objetivo, negocios y oficinas privadas con clima mediterráneo que requieren calefacción pocos meses al año. Se analizó el tamaño de mercado potencial y mercados adyacentes. Se concluyó que era una iniciativa muy prometedora pero que para llevarla a cabo se necesitaba financiación.

Para obtener financiación, se acudió a la convocatoria europea H2020-SMEInst-2018-2020-1, gestionada por la comisión H2020, en su call de septiembre de 2019. Esta convocatoria proporcionaba

50.000 € para ser invertidos en consultoría para conocer mucho mejor el mercado objetivo, los clientes, formas de acceder a ellos y el plan de marketing. En SME Instrument 1 se valoraban 3 variables, el impacto potencial que tenía la solución (tanto económico, como medioambiental, etc.), la excelencia de la solución (innovación, dificultad técnica...) y, por último, la capacidad de la empresa para llevar a cabo una distribución y venta satisfactorias.

La memoria presentada en esta convocatoria puede consultarse en el Anexo I de esta tesis. La propuesta fue evaluada muy positivamente, obteniendo una valoración de 13.12 sobre 15. Esta valoración permitió la obtención del sello de excelencia H2020 (Anexo 2), el cual significa un apoyo de la Unión Europea a la propuesta, de cara a otras convocatorias y a inversores.

Este sello ha permitido a la empresa continuar trabajando en esta línea de aplicación de la tecnología CBTE como sistema de calentamiento de aire en espacios cerrados.

CONCLUSIONES

Se ha logrado obtener una mezcla viable y estable que integra material susceptor para su implementación en diversas formulaciones cerámicas. Se han conformado 2 nuevas composiciones cerámicas (MBT01 y MBT02) con alto poder de calentamiento cuando se radiaron con microondas. La cantidad de susceptor es del 50% para MBT01 y del 66% para MBT02. En las aplicaciones de calefacción se ha seleccionado el primero, MBT01-AT, aunque no se descarta utilizar el segundo en otras aplicaciones de calentamiento. Se ha construido un calefactor de 4 células CBTE funcional capaz de aumentar su temperatura mediante energía de microondas conducida. Para evaluar el ahorro de energía de este calefactor, se ha comparado con un calefactor cerámico tradicional, alimentado por resistencias eléctricas. El calefactor CBTE y el convencional tardaron un tiempo similar en calentar 10 grados una cámara aislada de 338 L y, al requerir menos tiempo encendido para dicho aumento de temperatura, proporcionó un 40% de ahorro de energía en comparación con el convencional. El calefactor CBTE requiere un 10% del tiempo de calentamiento, y luego aprovecha su lenta liberación de calor, que es interesante para combinar varios calentadores similares en diferentes habitaciones de la misma casa sin necesidad de aumentar la potencia contratada. En resumen, es un inicio muy prometedor de cara a la aplicación de la tecnología CBTE como calentadora de fluidos.

BIBLIOGRAFÍA

Akkari, E., Chevallier, S., & Boillereaux, L. (2006). Observer-based monitoring of thermal runaway in microwaves food defrosting. *Journal of Process Control*, 16(9), 993-1001.

Al-Gaashani, R., Radiman, S., Aïssa, B., Alharbi, F. H., & Tabet, N. (2018). Development of microwave susceptors based on SiC composites and their application for a one-step synthesis of ZnO nanostructures. *Ceramics International*, 44(7), 7674-7682.

Alweendo, S. T., Johnson, O. T., Shongwe, M. B., Kavishe, F. P., & Borode, J. O. (2019). Synthesis, Optimization and Characterization of Silicon Carbide (SiC) from Rice Husk. *Procedia Manufacturing*, 35, 962-967.

Basak, T., & Rao, B. S. (2010). Theoretical analysis on pulsed microwave heating of pork meat supported on ceramic plate. *Meat science*, 86(3), 780-793.

Bhattacharya, M., & Basak, T. (2016). A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*, 97, 306-338.

Buffler, C. (1991). A guideline for power output measurement of consumer microwave ovens. *Microwave World* (1005) (15)

Carter, C. B., & Norton, M. G. (2007). *Ceramic materials: science and engineering* (Vol. 716, p. 712). New York: springer.

Chen, Y. T., Sheu, C. I., Lin, S. C., & Cheng, S. Y. (2008). Effects of microwave heating on dielectric and piezoelectric properties of PZT ceramic tapes. *Ceramics international*, 34(3), 621-624.

DIRECTIVA 2004/108/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de diciembre de 2004 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética y por la que se deroga la Directiva 89/336/CEE

Fang, G., Chen, W., Wang, C., Chan, M. Y., Deng, S., Liu, X., & Yan, H. (2019). A novel air source heat pump powered bed-based space heating (ASHP-BBSH) system for improved indoor thermal environment. *Energy Procedia*, 158, 2231-2236

Fernandez, J., Reyes-Davo, E., Reyes-Canovas, R., Garcia-Sevilla, J., Vela-Carrascosa, E., & Jara106 Rico, A. (2015). Heating cell, heater

using same, heating system and use thereof. ES2568749; PCT/ES,107 70712, 2015.

Murzin, S. P., & Balyakin, V. B. (2017). Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings. *Optics & Laser Technology*, 88, 96-98.

Oberthür, S., & Ott, H. E. (1999). *The Kyoto Protocol: international climate policy for the 21st century*. Springer Science & Business Media.

Peng, Z., Hwang, J. Y., & Andriese, M. (2013). Design of double-layer ceramic absorbers for microwave heating. *Ceramics International*, 39(6), 6721-6725.

Protocol, M. (1987). *Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer*. Washington, DC: US Government Printing Office, 26, 128-136.

Qu, S., Gong, Y., Yang, Y., Wen, X., & Yin, G. (2019). Grinding characteristics and removal mechanisms of unidirectional carbon fibre reinforced silicon carbide ceramic matrix composites. *Ceramics International*, 45(3), 3059-3071.

Sun, K., Wang, T., Chen, Z., Lu, W., He, X., Gong, W., ... & Chien, T. (2019). Clean and low-cost synthesis of high purity beta-silicon

Wang, Y., Bai, F., Jian, Y., Xu, C., & Wang, Z. (2012). Heat transfer enhancement of an electric air heating furnace by inserting silicon carbide ceramic foam panels. *Experimental thermal and fluid science*, 38, 127-133.

Wang, Y., You, S., Zheng, X., & Zhang, H. (2017). Accurate model reduction and control of radiator for performance enhancement of room heating system. *Energy and Buildings*, 138, 415-431.

Xue, P., Yang, F., Zhang, Y., Zhao, M., Xie, J., & Liu, J. (2019). Quantitative study on adjacent room heat transfer: Heating load and influencing factors. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101720.

Yu, T., Liu, B., Lei, B., Yuan, Y., Bi, H., & Zhang, Z. (2019). Thermal performance of a heating system combining solar air collector with hollow ventilated interior wall in residential buildings on Tibetan Plateau. *Energy*, 182, 93-109.

CAPÍTULO 2:

Construcción y caracterización de prototipo de calentador de fluidos alimentarios con tecnología CBTE

Pregunta de investigación 2: ¿Puede la tecnología CBTE calentar líquidos a temperaturas de pasteurización?

ABSTRACT

This study aimed to design, build, and characterize a fluid heater prototype based on BCET technology. To do this, successive CBTEs were inserted into a pipe, which was adapted to them by elbows, but this design achieved efficiencies of less than 20%. Afterwards, it was decided to immerse the CBTE in a fluid box with inlet and outlet pipes. This system achieved efficiencies of 70%, but when the plate reached temperatures above 100 °C, it had problems with welding, causing a trouble adaptation at the system. The problem was solved by making the liquid pass through two separated boxes, connected to each other, each of which was in contact with one of the sides of the BCET, the system having an inlet and an outlet pipe. The operation of the equipment was validated with water, citrus juices, milk, model solutions and sunflower oil. The prototype demonstrated its ability to increase fluid temperatures up to 80 °C, with an efficiency of 45%, which is expected to be improved in subsequent designs.

Key words: prototype, design, energy efficiency, fluid heater

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo diseñar, construir y caracterizar un prototipo de calentador de fluidos basado en tecnología CBTE. Para ello, primero se insertaron sucesivas CBTE en una tubería, que se adaptaba a ellas mediante codos, pero este diseño alcanzó eficiencias menores del 20%. Después, se optó por sumergir la CBTE en una caja de fluido con tubería de entrada y de salida. Este sistema consiguió unas eficiencias del 70%, pero al alcanzar la placa temperaturas superiores a 100 °C, tuvo problemas con la soldadura, provocando cortocircuito. Se consiguió solucionar el problema haciendo que el líquido pasara por dos cajas, conectadas entre sí, y una pared de cada una de las cuales era una de las caras de la CBTE, teniendo el sistema una tubería de entrada y una de salida. Se validó su funcionamiento con agua, disoluciones modelo y aceite de girasol. El prototipo demostró su capacidad para incrementar la temperatura de fluidos hasta 80 °C, con eficiencias del 45%, que espera ser mejorada en posteriores diseños.

Palabras clave: prototipo, diseño, eficiencia energética, calentador de fluidos

INTRODUCTION

En el capítulo 1 de la presente tesis, se ha optimizado el material cerámico de la tecnología CBTE siguiendo el criterio del que incrementa su temperatura más rápidamente, y posteriormente, la libera de forma más lenta. Tras este paso, se considera que la citada tecnología está en disposición de pasar al siguiente nivel de desarrollo, en su aplicación de calentar fluidos.

Una de las formas más extendidas de medir el nivel de madurez o desarrollo de una tecnología, es mediante los niveles TRL (Technology Readiness Level) (Delivered, 2014). Esta clasificación fue empleada por primera vez por la NASA, y posteriormente se extendió su uso por muchas otras organizaciones que realizan I+D en Estados Unidos y en la Unión Europea (la cual las aceptó en su programa H2020). Existen 9 niveles TRL, y, para resumirlos, puede considerarse que entre el 1 y el 4 la tecnología está en un nivel de laboratorio, entre el 5 y el 6 en un entorno de simulación controlada, y entre el 7 y el 9 en un entorno real. La clasificación TRL se ha usado en muchos ámbitos tecnológicos distintos, tales como el de reciclaje químico de plástico (Solis & Silveira, 2020), aeroespacial (Branz & Francesconi, 2017) o aprovechamiento de CO₂ (Van der Spek et al., 2017), entre muchos otros.

A partir del TRL 4, las tecnologías se suelen desarrollar a base de prototipos, entendiéndose como tales, una primera versión de un equipo que lleva implementada la tecnología a desarrollar, y que se espera que pueda hacer su función objetivo y sobre la cual ir implementando mejoras e incrementos de tamaño. Generalmente, los prototipos deben ser diseñados y aceptados por todos los actores involucrados en la innovación y en el futuro proceso productivo, en una labor en conjunto (Lauff et al., 2020). De esta forma, se le da al prototipo la capacidad de encajar mejor en el proceso productivo, realizando su función de una forma más satisfactoria y eliminando posibles dificultades a la hora de encajar la futura maquinaria en una línea de producción, así como solucionando los problemas que puedan surgirle al productor o al usuario final (Cerruela-García, 2019).

Para que una tecnología destinada a calentar fluidos, como es el caso de la CBTE, sea competitiva en este campo, debe reunir ciertas

características. Estas características son: que pueda calentar hasta temperaturas de pasteurización (en torno a 80 °C) y que tenga una eficiencia energética superior al 30%, ya que es la mínima actual alcanzada por intercambiadores de calor convencionales (Choi et al., 2018). Por lo tanto, estas son las premisas a tener en cuenta en el diseño de un prototipo para poder validar la tecnología CBTE en un entorno de simulación controlada, y así incrementar su TRL.

En el campo de calentamiento de fluidos, y sus procesos más típicos, como por ejemplo la pasteurización de fluidos alimentarios, también se realizan prototipos para desarrollar innovaciones y llevarlas a producción a escala real. Algunos ejemplos de prototipos aplicados a los citados procesos son pasteurizadores por energía solar usados para purificar agua (Carielo et al., 2017), combinaciones de altas presiones hidrostáticas y microondas para asegurar la conservación de purés preparados (Inanoglu et al., 2020) o, para algunos procesos muy concretos (sobre todo para aguas de consumo humano), pasteurización química asistida con TiO_2 (Monteagudo et al., 2017), entre muchos otros.

Algunas de estas innovaciones tienen el objetivo de aumentar la precisión del calentamiento, su flexibilidad o su eficiencia, mientras que otras, el de obtener un mejor producto final. A su vez, algunas de ellas ya han pasado de un ámbito de laboratorio y de producción científica, a una escala de producción real, aportando a la industria sus ventajas. Un ejemplo de esto son los purés y zumos esterilizados por altas presiones, que, al estar ya a la venta, significa que han alcanzado el TRL 9. Esto demuestra que la pasteurización es un campo en el que se está continuamente innovando y que existen mejoras que pueden ser aplicadas a procesos y productos muy concretos, aportándoles grandes ventajas. Además, no se han encontrado referencias sobre pasteurizadores basados en cerámicas radiada por microondas, lo que deja un margen de mejora y un nicho de mercado a explotar en dicho ámbito.

Es remarcable que algunas de estas tecnologías han demostrado tener efectos no térmicos en el fluido a calentar. Estos efectos son efectos colaterales producidos por la tecnología de calentamiento (como agitación molecular o presión mecánica). Existen numerosos estudios de los efectos no térmicos en la aplicación de microondas (Kubo et al., 2020), algunos de ellos (Guo et al., 2020) concluyen que

la agitación molecular aumenta la letalidad en procesos de pasteurización, siendo entonces un efecto positivo y deseable. Otro ejemplo interesante son los efectos no térmicos de las altas presiones hidrostáticas mencionados por Stinco et al., (2020), que en su trabajo consiguieron pasteurizar zumo de naranja, aplicándole previamente al tratamiento térmico, altas presiones. No se redujeron las propiedades nutricionales del zumo, tales como los carotenoides o las vitaminas, que son termolábiles, pero la presión mecánica permitió aplicar tiempos de tratamiento más cortos que los convencionales (15 s frente a los 2 minutos a 82 °C cuando no se aplican altas presiones).

Estos efectos no térmicos pueden ser deseables, o no, durante el procesado, pero en todo caso, han de ser tenidos en cuenta, incrementando la complejidad de los cálculos. Por el contrario, la tecnología CBTE ejercerá únicamente procesos térmicos en los líquidos a calentar simplificando el proceso. Por este motivo, su funcionamiento, en una primera etapa, se ha validado únicamente en la temperatura que se alcanza en el fluido y en su homogeneidad de calentamiento, no requiriendo efectuar más análisis de ningún otro tipo.

El objetivo de este capítulo fue desarrollar un prototipo de calentador de fluidos con tecnología CBTE y caracterizar su capacidad de calentamiento manteniendo el caudal y variando el tipo de fluido (con distintas propiedades térmicas). El caudal que calentar será de un 5% del caudal de un posible pasteurizador industrial. Con esto, se espera pasar del TRL4 al TRL5, acercando así la tecnología a las pruebas en un entorno real.

MATERIALES Y EXPERIMENTAL

Diseños de prototipo

Se realizaron un total de 3 diseños conceptuales de prototipo basado en la CBTE. Para realizar los planos y esquemas de los sucesivos prototipos se emplearon programas específicos de diseño, concretamente AutoCAD (Autodesk, USA) y SolidWorks (Dassault, Francia).

Los diseños se basaron en la premisa de maximizar la superficie de contacto de la CBTE con el líquido circulante, tratando así de alcanzar la mayor eficiencia energética posible. También se consideró la variable de poder funcionar continuamente largos periodos de tiempo sin que hubiera fallos relacionados con su diseño constructivo.

Construcciones de prototipo

Para construir el prototipo se contó con la asistencia del taller mecánico especializado en maquinaria adaptada a medida, Sistemas RBT. Se utilizaron 4 células básicas en cada uno de los diseños del elemento calefactor, que, en su conjunto, presentan una superficie de intercambio de calor de 0.01968 m^2 . El diseño del elemento calefactor fue el único que varió entre los tres diseños. A continuación, se definen los elementos que formarán parte del calentador de fluidos y la Figura 2.1 muestra un esquema de flujo del sistema:

- 1. ELEMENTO CALEFACTOR: EL Cuerpo del calentador de fluidos basado en tecnología CBTE, y que será diferente en las 3 fases de diseño (1 figura 2.1). Es la parte en la que radica la novedad de la tecnología y tiene lugar la aportación de energía calorífica.
- 2. La CBTE, que consta de 4 celdas (definidas en detalle en el capítulo 1) fue alimentada de energía de microondas a través de un cable coaxial (representado por línea negra en la figura

2.1) por un equipo de microondas de potencia regulable hasta 250W (Ampleon, Países Bajos), (2 en la Figura 2.1).

- 3. DEPÓSITO: Para almacenar 1L de líquido que recirculaba, se empleó un depósito con forma cilíndrica de dos láminas de acero separadas por una cámara de aire, el cual actúa como aislante de la temperatura (3 Figura 2.1). Dicho depósito se modificó para insertarle tubos de entrada y de salida, así como una sonda de medida de temperatura en el centro geométrico del depósito.
- 4. BOMBA IMPULSORA: para impulsar el líquido a calentar se empleó una bomba de impulsión capaz de producir un caudal no regulable de 2 litros por minuto (representada como 4 en la figura 2.1). Se comprobó que podía funcionar adecuadamente con fluidos con viscosidades de un máximo de 0.035 Pa·s, mientras que los de viscosidades superiores le provocaban saturación y no podía impulsarlos.
- TUBOS: Los distintos elementos constructivos del prototipo se conectaron por tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 8 mm de diámetro (representado por las conexiones azules en la figura 1). En total se utilizó una longitud de 40 cm de tubo para unir todos los elementos. Este tipo de plástico sufría una leve deformación (irrelevante en estos diseños) a partir de 80 °C, y comenzaba a degradarse a los 100 °C, por lo que fue el factor limitante a la hora de incrementar la temperatura alcanzada por el fluido.

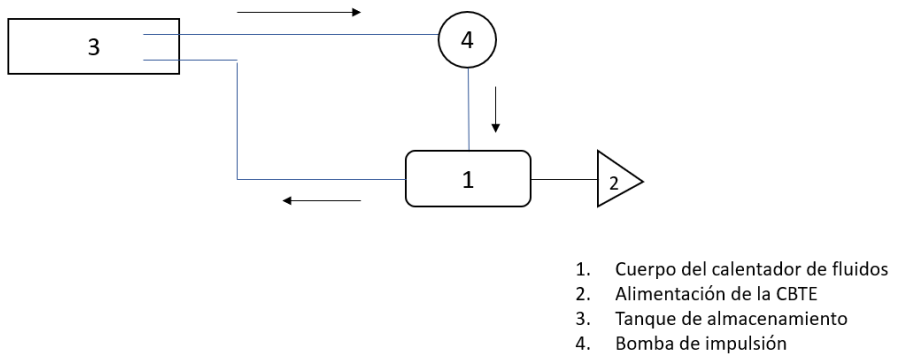


Figura 2.1 Elementos comunes en todas las fases del calentador de fluidos por tecnología CBTE.

Caracterizaciones de prototipo

La caracterización del prototipo se basó en la medida de la temperatura alcanzada por el fluido y por la placa en función de la potencia de microondas aplicada según el software de control. Para medir la temperatura del fluido se empleó una sonda termopar Multithermometer modelo 3KTR5 (Grainger, USA) ubicada aproximadamente en el centro geométrico del depósito. La temperatura de la placa CBTE se midió en 4 puntos diferentes de la misma utilizando una sonda de medición de temperatura por contacto tipo K modelo TP04 (Pico Technology, UK).

Para regular y controlar la potencia de microondas emitida y la reflejada por la célula de 4, se utilizó el software LeanOn MW 1-1,4 (Leanfa, Italia), el cual permite regularla con precisión de 1 W, entre 0 (apagado) y un máximo de 250 W. Además, permite regular la frecuencia a la que se emiten las microondas con una precisión de 1 MHz entre 2420 MHz y 2480 MHz, lo que permitiría minimizar la potencia reflejada en caso de emitir sobre un material desconocido. Dado que la CBTE de 4 está calculada para absorber con un eficiencia mayor al 99% (cap 1) la energía de una onda a 2450 MHz, este parámetro se dejó fijo para todos los experimentos. La interfaz del software se muestra en la Figura 2.2.2. También se evaluaron ciclos de encendido-apagado para utilizar la inercia térmica de la

cerámica optimizada para este fin, algo que se podía automatizar desde el software cambiando de modo manual a modo automático.



Figura 2.2. Interfaz del software LeanOn

A cada una de las fases de diseño del prototipo, se le realizaron pruebas preliminares de calentamiento de agua para evaluar su funcionamiento y su eficiencia.

Una vez optimizado el diseño, y con el fin de caracterizarlo, se realizaron pruebas de calentamiento con agua, disoluciones modelo con concentraciones crecientes de NaCl y de sacarosa (entre 4 y 160 g/l), y aceite de girasol. Las propiedades los fluidos con los que se caracterizó el prototipo se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: propiedades de las disoluciones de ensayos de calentamiento

FluidName	Calor específico [J/kgK]	densidad [kg/m ³]	Viscosidad [Pa*s]
Agua	4186	1000	0.001
Aceite de girasol	1780	918	0.032
Disol NaCl (g/L)			
8	4153	1009	0.002
12	4140	1013	0.003
20	4113	1023	0.006

40	4047	1046	0.012
80	3915	1092	0.025
160	3650	1185	0.035
Disol Sacarosa (g/l)			
8	4164	1004	0.002
12	4156	1007	0.003
20	4141	1011	0.006
40	4103	1023	0.012
80	4026	1046	0.025
160	3872	1093	0.035

Los experimentos de calentamiento para caracterizar el prototipo, en su tercer diseño, se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento: se encendió la potencia de microondas, hasta que la CBTE alcanzaba la temperatura de 100 °C, con todo el sistema lleno de fluido en estático (sin hacerlo circular), a continuación, se activaba la bomba y el flujo comenzaba a circular. El sistema se mantenía funcionando, calentando 1.2 L de líquido (1 L en el depósito y 0.2 L en circulación) en recirculación, hasta alcanzar los 80 °C, utilizando diferentes potencias de microondas (150, 200 y 250 W). Esto se hizo así para maximizar la velocidad de calentamiento, ya que existen numerosos estudios (Madrid & Madrid, 2004) que indican que un calentamiento rápido en un proceso de pasteurización es menos perjudicial para las cualidades organolépticas del fluido alimentario.

También se comparó su capacidad de calentamiento con el de un baño de laboratorio (Selecta, España), por tomar como referencia una forma de calentamiento convencional con resistencias eléctricas. El baño funcionaba con una potencia de 1000 w, pero tenía una capacidad de 3.5 L de agua, por lo que se tuvo en cuenta la relación masa/potencia para calcular la velocidad de calentamiento y que esta fuera comparable.

Cálculo de la eficiencia energética

La eficiencia energética (EA, %) de cada prototipo fue calculada mediante la ecuación 3, que es la proporción de la energía emitida (E_1 , Julios) por el prototipo (ecuación 1), que es absorbida por el fluido (E_2 , Julios) (ecuación 2).

Resultados

$$E_1 = P \cdot t \quad (1)$$

$$E_2 = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$EA = \left(\frac{E_2}{E_1} \cdot 100 \right) \quad (3)$$

Siendo P la potencia (W) a la que funcionaba el equipo, t, el tiempo que ha estado encendido (s), m (kg/s) el caudal másico del fluido a calentar, c_p (J/kgK) su calor específico y ΔT (K) su incremento de temperatura.

RESULTADOS

Diseño y construcción del prototipo de cuerpo calefactor

El proceso de construcción del prototipo final, buscando que cumpliera las especificaciones marcadas (un mínimo del 30% de eficiencia energética y poder funcionar en ciclos largos sin que aparecieran problemas) se llevó a cabo mediante un proceso de ensayo error. Cada prototipo fue analizado con las pruebas preliminares y su resultado se tuvo en cuenta para el diseño del siguiente, habiéndose completado 3 fases en la iteración.

Fase 1

La primera fase de diseño y construcción del cuerpo del calentador de fluidos se muestra en la Figura 2.3, y consistió en una tubería de acero de 3 mm de grosor de la pared, y forma rectangular de 4x2 cm de sección, con 9 codos, donde se adaptaron cuatro celdas calefactoras, cada una de ellas a una de sus paredes interiores. Este diseño fue descartado rápidamente ya que, en las pruebas preliminares de calentamiento de agua, alcanzó eficiencias energéticas de menos del 20% para las dos potencias que se probaron, 200 y 300 W. Se consideró que las eficiencias bajas podían deberse, en primer lugar y como razón principal, al material metálico que conformaba la tubería, el cual actuaría como interfaz disminuyendo la eficiencia de calentamiento, ya que además, provocaba una pérdida de calor por el resto de caras del sistema, y en segundo lugar, como razón secundaria, a una dinámica de fluidos desfavorable, que hace que el fluido pase demasiado rápido por las superficies calefactoras, impidiendo así que se caliente adecuadamente.

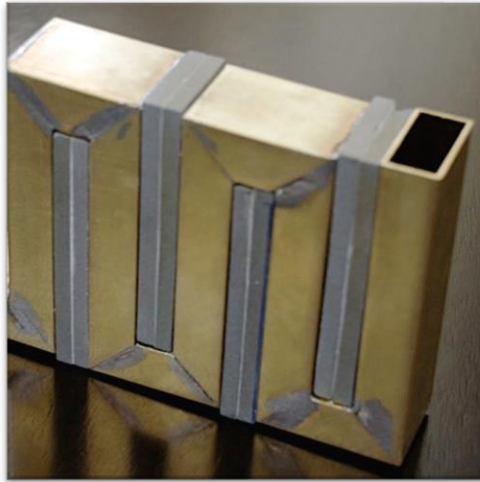
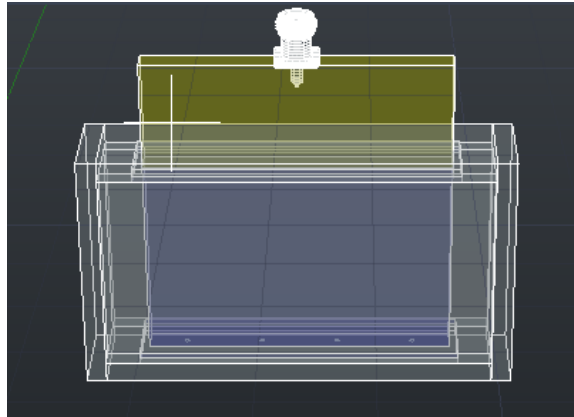


Figura 2.3 Primer diseño del cuerpo del calentador de fluidos con tecnología CBTE

Fase 2

Para mejorar la eficiencia de calentamiento, se realizó un segundo diseño en el que los elementos calefactores se sumergían en contacto directo con el fluido. Este diseño y el prototipo construido se muestra en la Figura 2.4. El diseño consistía en una caja de metacrilato y estaño, con una tubería de entrada y otra de salida (conexión con los tubos de PVC) en la que se sumergía una célula de 4 (4 células básicas unidas por una placa de cobre actuando como una sola, a las que se les transmitía la energía mediante un divisor de potencia dimensionado específicamente). Se consideró que de esta forma la superficie del elemento calefactor estaba totalmente en contacto con el líquido a calentar, y el resto de las paredes se podían aislar por otros medios (recubrirlas por una capa de material aislante, como alúmina, lana de vidrio o lana de roca del grosor suficiente). Las pruebas preliminares de eficiencia energética fueron muy prometedoras, alcanzando eficiencias de en torno al 70%. Sin embargo, al ser sometido a nuevas pruebas preliminares, con ciclos de calentamiento de mayor duración, a los 27 minutos de funcionamiento, la soldadura del cobre con el estaño sufrió dilataciones, provocando que el agua entrara en el sistema CBTE,

humedeciendo la cerámica y provocando una pérdida de adaptación del sistema, lo que imposibilitaba su funcionamiento. Al haber obtenido una eficiencia energética aceptable, se buscó realizar un sistema lo más similar posible, con otros materiales que si permitieran realizar pruebas de calentamiento de una mayor duración.



(a)



(b)

Figura 2.4 Segundo diseño (a) y construcción (b) del calentador de fluidos basado en tecnología CBTE

Con el objetivo de solucionar los problemas de soldadura detallados en la sección 3.1.2 se decidió realizar un tercer diseño. El tercer diseño consistió en aprovechar el contacto que tenía la CBTE con el fluido de forma similar al diseño 2, pero separando cada una de las caras de la CBTE en cajas distintas, conectadas entre sí. En esta fase se usó acero inoxidable como material, tanto de las cajas por las que circula el fluido, como de contacto con las 4 CBTE (que actúan como una sola de igual forma que en el anterior diseño). El prototipo se muestra en la Figura 2.5. Este diseño obtuvo en las pruebas preliminares una eficiencia de aproximadamente el 45%, la cual es inferior al diseño dos, pero superior al diseño 1. No se considera que esta reducción de la eficiencia se deba al cambio de materiales, ya que el acero es, también, un buen conductor del calor. La falta de eficiencia puede estar relacionada con la dificultad de acoplamiento de las piezas del sistema, que deja una capa de aire entre la CBTE y el acero, que actúa como un aislante disminuyendo la eficiencia del sistema. Sin embargo, el prototipo mostró su capacidad para poder funcionar durante pruebas de larga duración, ya que se tuvo en funcionamiento 4 horas seguidas sin detectar ningún fallo ni variación en su funcionamiento.

Con todo ello se decidió caracterizar en profundidad este último prototipo y tomarlo como punto de partida para aplicarle mejoras, usándolo como demostrador de calentador de fluidos por tecnología CBTE.

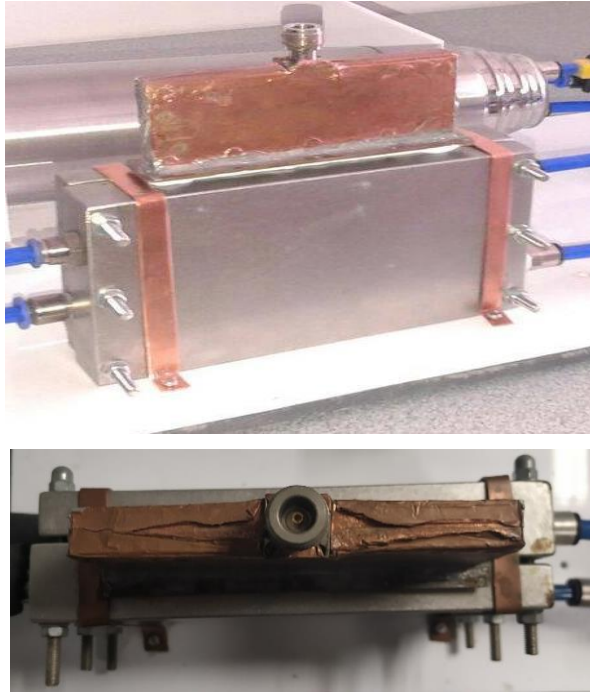


Figura 2.5 tercer diseño (a) y construcción (b) del calentador de fluidos basado en tecnología CBTE

Pruebas preliminares

Un ejemplo del proceso de pruebas preliminares, concretamente el realizado para el diseño de prototipo 3, se muestra en la Figura 2.6. Como puede observarse, el ciclo de calentamiento de la placa y del fluido son similares, alcanzando el agua temperaturas de aproximadamente 70°C en unos 40 minutos. Ambos se ajustan a un modelo polinómico de segundo grado. Estas pruebas fueron aptas ya que el prototipo pudo hacer varios ciclos como el que se muestra en la figura sin que apareciera ningún problema de funcionamiento ni desviación en los resultados. Se observa que tanto el calentamiento de agua como el de la placa por tecnología CBTE en las pruebas preliminares se ajusta a un polinomio de segundo grado

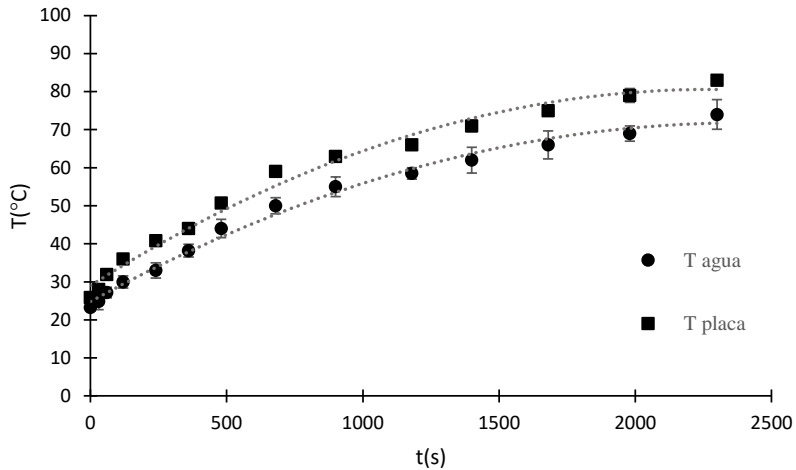


Figura 2.6 Ejemplo de pruebas preliminares (diseño de prototipo 3). Calentamiento de 2 L/min con 200 W

Caracterización y validación del prototipo

Una vez verificado, mediante las pruebas preliminares, que el tercer diseño del calentador de fluidos por CBTE era viable para realizar pruebas de calentamiento de larga duración, se caracterizó para comprender mejor su funcionamiento y validar su capacidad de calentamiento para distintos fluidos. Para ello, se suministró potencia de microondas (200 W) a la placa hasta que esta alcanzó los 100 °C, momento en el cual se activó la bomba y por tanto comenzó a impulsarse el líquido a calentar. La potencia aplicada a la placa fue constante durante todo el ensayo. La figura 2.7 muestra la evolución de la temperatura (tanto de la placa como del líquido circulante, que en este caso es agua) en un típico proceso de calentamiento del prototipo. Como puede observarse, en los primeros 140 segundos, la velocidad de calentamiento del fluido es muy alta, debido a la gran diferencia de temperatura con la placa calefactora, llamando a esta fase periodo inicial o primer periodo. A partir de ese momento, se considera que llega a régimen (llamándolo por tanto periodo de régimen o segundo periodo). En este período al aportarle una potencia constante, la fuerza impulsora del calentamiento del fluido,

(diferencia de temperatura del fluido con la placa), es constante (en este caso entre 10 y 15 °C), lo que hace que, la velocidad de calentamiento del fluido sea constante con el tiempo. Cabe remarcar también, que en 22 minutos aproximadamente, se alcanzan temperaturas de 80 °C, que serían temperaturas aptas para procesos de pasteurización.

A partir de la figura 2.7 se deduce que el funcionamiento del calentador de fluidos por CBTE es muy similar, desde el punto de vista del calentamiento, al de un intercambiador de calor convencional de flujo paralelo. En los intercambiadores de calor de flujo paralelo, la fuerza impulsora (diferencia de temperatura entre fluidos), es constante, de igual forma que se puede observar en la figura 6. Esta fuerza impulsora es, en el global del proceso, menor que la de un intercambiador de calor de flujo en contracorriente, por lo que la eficiencia energética potencial que pueden alcanzar los intercambiadores de calor de flujo paralelo nunca será tan alta como los de flujo cruzado, pero pueden aportar otras ventajas, tales como la precisión de calentamiento (menores oscilaciones) o su menor coste (Levenspiel, 2014).

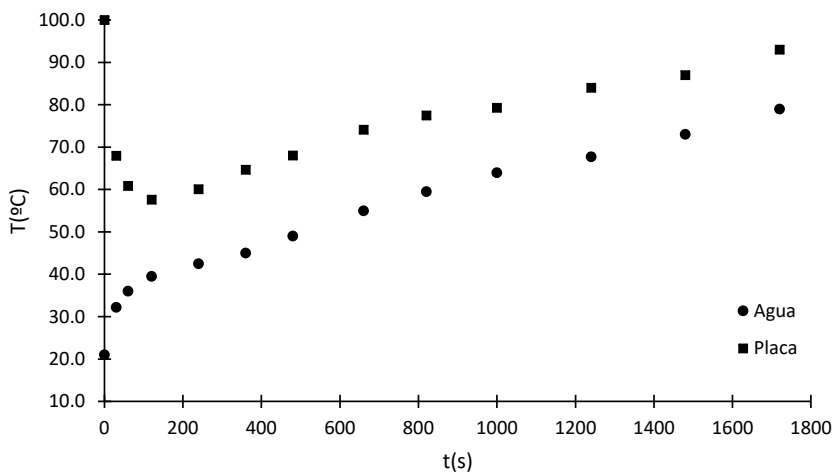
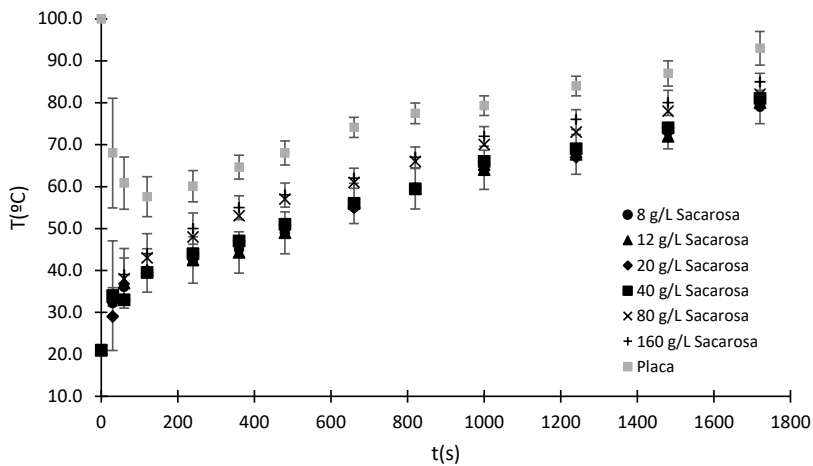


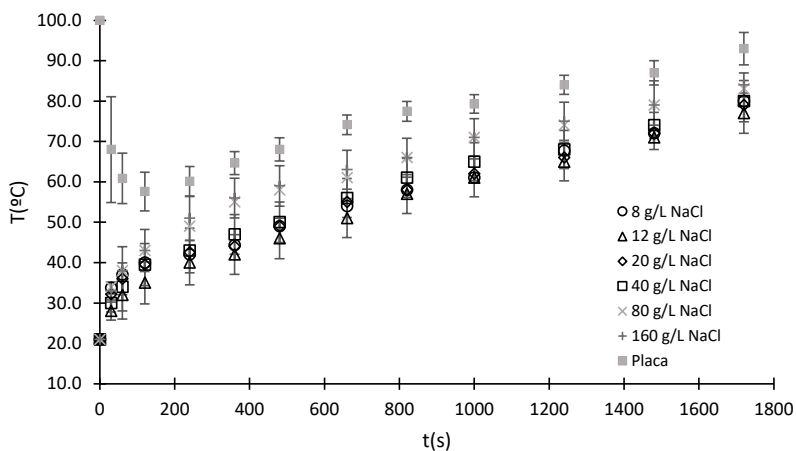
Figura 2.7 Proceso típico de calentamiento de agua con un calentador de fluidos por tecnología CBTE

Para evaluar el funcionamiento del sistema en otros fluidos alimentarios, que en otros estudios han sido calentados con microondas directamente (Bermudez et al., 2015), se realizaron pruebas con disoluciones de sacarosa y de NaCl con concentraciones crecientes entre 8 y 160 g/L. La figura 2.8 muestra los resultados obtenidos para el calentamiento de (a) disoluciones de sacarosa de concentración creciente y (b) disoluciones de concentraciones crecientes de NaCl. Como puede observarse, el proceso de calentamiento es similar al del agua, dividiéndose en un periodo inicial, con una gran velocidad de calentamiento, y una fase de régimen con una velocidad de calentamiento menor y constante. Además, a mayor concentración de soluto, la temperatura alcanzada fue mayor, lo que estaría relacionado con la reducción del calor específico al aumentar la concentración. El análisis estadístico de los resultados mostró que no existen diferencias significativas a igual concentración entre sacarosa y NaCl, por tener un calor específico y viscosidad similares. En el tiempo de calentamiento, de 1720 segundos, todas las concentraciones alcanzaron temperaturas cercanas a 80 °C, considerada como una temperatura óptima para procesos de pasteurización.



(a)

Resultados



(b)

Figura 2.8 calentamiento de disoluciones con concentraciones crecientes de (a) sacarosa (b) NaCl

Mediante el cálculo de la derivada de la función ajustada en cada uno de los tramos (ajuste lineal), se calculó la velocidad de calentamiento para cada disolución en ambos tramos. La tabla 2.2 muestra las velocidades de calentamiento obtenidas en los dos periodos, inicial y de régimen, así como el coeficiente de correlación en el ajuste lineal de estos periodos. Los valores obtenidos de velocidad en los dos tramos, muestran una diferencia importante entre ambos periodos, siendo la velocidad en el primer tramo del orden de 10 veces superior a la del periodo de régimen. Esto es un indicador de la ventaja que tiene elevar la temperatura de la placa antes de comenzar el ciclo de calentamiento, ya que calentar a mayor velocidad ha demostrado ser útil para una mejor conservación de las cualidades organolépticas de ciertos fluidos alimentarios (Miranda-Zamora & Stoforos, 2016). Se realizó un ANOVA para analizar la influencia de la concentración en la velocidad de calentamiento. Como puede observarse, a concentraciones bajas de soluto (hasta 40 g/L), tanto en el caso de sacarosa como en NaCl, el nivel de concentración no influye significativamente sobre la velocidad de calentamiento. Sin embargo, al aumentar la concentración, aumenta significativamente la velocidad en los dos tramos. Esto podría

explicarse, por el efecto de la concentración sobre el calor específico de la disolución. Así, al aumentar la concentración, disminuye el calor específico, haciendo que la disolución requiera menos energía para aumentar su temperatura.

Tabla 2.2 Velocidades de calentamiento de las disoluciones en el calentador de fluidos CBTE

Soluto	Concentración (g/L)	Velocidad tramo 1 (°C/s)	R ²	Velocidad tramo 2 (°C/s)	R ²
Sacarosa	8	0.12±0.02 ^A	0.73±0.03	0.017±0.002 ^A	0.996±0.002
	12	0.14±0.02 ^B	0.71±0.02	0.015±0.002 ^B	0.992±0.003
	20	0.12±0.01 ^B	0.85±0.05	0.017±0.002 ^B	0.997±0.002
	40	0.13±0.02 ^B	0.79±0.04	0.016±0.002 ^B	0.991±0.003
	80	0.19±0.019 ^C	0.86±0.05	0.018±0.001 ^C	0.997±0.003
	160	0.21±0.03 ^D	0.89±0.07	0.019±0.001 ^D	0.993±0.002
NaCl	8	0.14±0.02 ^b	0.72±0.03	0.015±0.002 ^a	0.992±0.001
	12	0.13±0.02 ^b	0.7±0.03	0.014±0.002 ^a	0.995±0.002
	20	0.11±0.02 ^a	0.85±0.04	0.0133±0.0014 ^a	0.991±0.001
	40	0.16±0.02 ^b	0.79±0.03	0.015±0.002 ^a	0.997±0.003
	80	0.19±0.03 ^c	0.84±0.02	0.017±0.0019 ^b	0.993±0.002
	160	0.21±0.04 ^d	0.88±0.06	0.018±0.002 ^c	0.992±0.003

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras por efecto de la proporción de susceptor (mayúsculas) y por efecto de la temperatura de sinterización (minúsculas)

Para corroborar el efecto del calor específico en la velocidad de calentamiento, se realizaron las mismas pruebas con un fluido de menor calor específico (aceite de girasol). El aceite (Figura 2.9) tardó aproximadamente un 50% menos de tiempo que el agua y las disoluciones acuosas, a igual potencia, en ser calentado hasta 80 °C (780 s el aceite frente a 1720 s el agua). Esto se tradujo en una velocidad de calentamiento de 0.29±0.07 °C/s en el primer periodo y de 0.041±0.005 °C/s en el segundo, confirmando así, que un calor específico inferior conlleva unas velocidades de calentamiento mucho mayores. Además, hay que tener en cuenta que las propiedades reológicas del aceite son muy distintas a las del resto de fluidos que se han calentado anteriormente, especialmente su mayor

viscosidad, lo cual también podría provocar patrones de circulación distintos, y con ello diferencias en el calentamiento que no estén únicamente influidas por el calor específico.

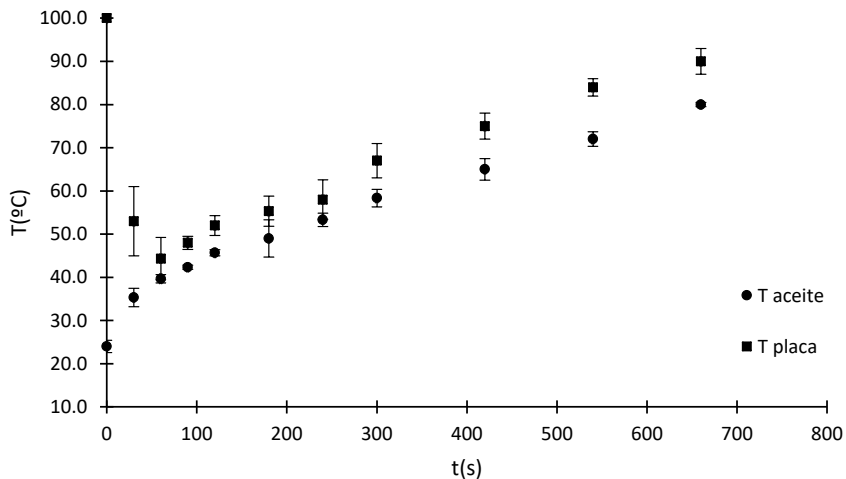


Figura 2.9 Calentamiento de aceite mediante el calentador de fluidos por CBTE

Eficiencia energética y comparación con alternativas

Primeramente, se comparó experimentalmente el calentador de fluidos CBTE con una alternativa clásica de calentamiento de fluidos mediante electricidad. Para ello, se empleó un baño termostático. Para compararlos adecuadamente, es necesario tener en cuenta la proporción masa/potencia. En este caso, la potencia del baño era de 1000 W para calentar 2.5 L de agua, mientras que el calentador CBTE utilizaba una potencia de 200W con 1.15 L. Por tanto, se hizo la equivalencia y se aplicó un factor de corrección para determinar el aumento de temperatura equivalente en los dos sistemas. Los datos así obtenidos se muestran en la figura 2.10. En el caso del baño, se observa una velocidad de calentamiento constante, habitual en este tipo de sistemas, mientras que en el calentador CBTE, se distinguen las dos etapas de calentamiento que ya se habían observado en los apartados anteriores. Cabe destacar que la velocidad en el baño (0.02 ± 0.04 °C/s) es similar a la del segundo período del CBTE

($0.02 \pm 0.03^\circ\text{C/s}$). Sin embargo, como consecuencia del calentamiento rápido en el primer periodo de tiempo, el calefactor CBTE es capaz de llevar el agua a una misma temperatura en un tiempo mucho menor.

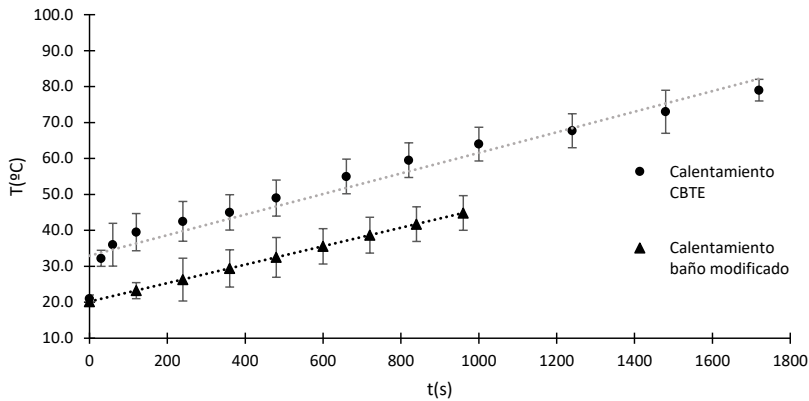


Figura 2.10 Calentamiento de agua por CBTE y por resistencia eléctricas.

A partir de los resultados obtenidos para el calentamiento del agua, se calculó la eficiencia energética del calentador de fluidos por tecnología CBTE, tal y como se ha comentado en Materiales y Métodos, obteniéndose un valor del 45% para esta tecnología frente al 42% para el baño.

Para poder comparar esta eficacia, en tabla 2.3 se muestra la eficiencia determinada a partir de los datos publicados en otros trabajos en los que se calientan fluidos con sistemas innovadores (algunas de ellos basados en microondas). La eficacia de cada uno de los sistemas se ha calculado en base a los datos reflejados en los trabajos de potencia empleada (W), caudal (kg/m) y calor específico (J/kgK) del fluido tratado e incremento de temperatura alcanzado ($^\circ\text{C}$).

Tabla 2.3 Comparación de la eficiencia del calentador de fluidos con otros métodos de desarrollo reciente.

Ref.	Método de calentamiento	cp fluido (J/kgK)	Caudal (kg/min)	Potencia (w)	ΔT (°C)	Eficiencia (%)
Inanoglu et al., 2020	Altas presiones hidrostáticas + microondas	4180	0.5	5000	45	16
Nebbia et al., 2020	Pasteurizador de placa calentada por resistencias eléctricas	3890	0.17	100	72	33
Gonzalez-Monroy et al., 2018	Pasteurizador asistido con microondas	3850	0.48	490	76	48
Stratakos et al., 2016	Pasteurizador industrial por microondas	3940	1.6	18000	81	37.5
Choi et al 2018	Intercambiador de calor convencional	4180	20		12	60 (*)
	CBTE	4180	2	200	2	45
	Baño termostatado	4180	5	1000	10	42

(*) eficiencia indicada por el autor determinada como proporción de energía transmitida al fluido frío por el fluido calefactor

Como puede observarse, la eficacia energética en los sistemas que utilizan energía de microondas para calentar son del mismo orden que la determinado en el sistema CBTE, y superiores a un sistema donde se calienta una placa mediante resistencias eléctricas. La combinación de altas presiones con microondas también resulta muy poco eficiente energéticamente.

En los intercambiadores tradicionales, alimentados por combustibles fósiles, normalmente se cuantifica la eficacia como la proporción de energía transmitida desde el fluido caliente al frío, no siendo comparable esta con los valores de eficacia calculados en este trabajo. De hecho, en la tabla 2.3 parece que la eficiencia del intercambiador tradicional sea mayor que la del calentador CBTE, pero dichos valores son difíciles de comparar, puesto que el proceso de combustión no puede cuantificarse en términos de vatios hora.

A pesar de que la eficiencia energética con este sistema CBTE ha sido elevada, este calentador está en una etapa de primer prototipo viable, con lo que todavía puede ser optimizado para aumentar su eficacia. En este sentido, se continuará trabajando en nuevos prototipos para obtener una eficacia cercana al 60%.

Para ello, el siguiente objetivo del trabajo fue la mejora de la transferencia de energía desde la placa al fluido. Así, se optó por utilizar herramientas de simulación multifísica para abordar la siguiente fase del trabajo.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado un prototipo de calentador de fluidos por CBTE, siguiendo tres fases aproximativas, obteniendo finalmente un prototipo capaz de funcionar de forma fiable y prolongada. El calentamiento de varios fluidos alimentarios en el prototipo ha sido caracterizado, observándose dos períodos de calentamiento, un primero muy rápido y un segundo más lento. Este comportamiento difiere del calentamiento en un intercambiador de calor convencional, donde el aumento de temperatura es lineal durante todo el proceso. Además, la eficiencia energética obtenida en el diseño final fue del 45%. Se ha comparado esta eficiencia con otros equipos alimentados con energía de microondas, obteniéndose resultados similares. Comparándola con equipos de resistencias eléctricas la eficacia es mayor. En cualquier caso, se pretende continuar los estudios para mejorar el nivel de eficacia con el objetivo de llegar a valores cercanos al 60%.

Con todo esto, se ha conseguido que el TRL de la tecnología se incremente de 4 a 5.

BIBLIOGRAFÍA

- Aghajanzadeh, S., & Ziaifar, A. M. (2018). A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 1-12.
- Bermúdez, J. M., Beneroso, D., Rey-Raap, N., Arenillas, A., & Menéndez, J. A. (2015). Energy consumption estimation in the scaling-up of microwave heating processes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95, 1-8.
- Branz, F., & Francesconi, A. (2017). Experimental evaluation of a Dielectric Elastomer robotic arm for space applications. *Acta Astronautica*, 133, 324-333.
- Carielo, G., Calazans, G., Lima, G., & Tiba, C. (2017). Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination. *Renewable Energy*, 105, 257-269.
- Cerruela-García, G., de Haro-García, A., Toledano, J. P. P., & García-Pedrajas, N. (2019). Improving the combination of results in the ensembles of prototype selectors. *Neural Networks*, 118, 175-191.
- Choi, Y. H., Song, D., Seo, D., & Kim, J. (2018). Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand. *Energy and Buildings*, 172, 152-158.
- Delivered, E. I. (2014). The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations. Earto Impact Delivered.
- Fernández-Ferrín, P., Bande, B., Galán-Ladero, M. M., Martín-Consuegra, D., Díaz, E., & Castro-González, S. (2019). Geographical indication food products and ethnocentric tendencies: The importance of proximity, tradition, and ethnicity. *Journal of cleaner production*, 241, 118210.
- González-Monroy, A. D., Rodríguez-Hernández, G., Ozuna, C., & Sosa-Morales, M. E. (2018). Microwave-assisted pasteurization of beverages (tamarind and green) and their quality during refrigerated storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 51-57.

Guo, C., Wang, Y., & Luan, D. (2020). Non-thermal effects of microwave processing on inactivation of *Clostridium Sporogenes* inoculated in salmon fillets. *LWT*, 109861.

Inanoglu, S., Barbosa-Cánovas, G. V., Patel, J., Zhu, M. J., Liu, F., Tang, Z., & Tang, J. (2020). Impact of high-pressure and microwave-assisted thermal pasteurization on inactivation of *Listeria innocua* and quality attributes of green beans. *Journal of Food Engineering*, 110162.

Kubo, M. T., Siguemoto, É. S., Funcia, E. S., Augusto, P. E., Curet, S., Boillereaux, L., ... & Gut, J. A. (2020). Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 36-48.

Lauff, C. A., Knight, D., Kotys-Schwartz, D., & Rentschler, M. E. (2020). The role of prototypes in communication between stakeholders. *Design Studies*, 66, 1-34.

Levenspiel, O. (2014). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Reverté.

Madrid, V., & Madrid, C. (2001). *Nuevo manual de industrias alimentarias*. A. Madrid Vicente Ediciones.

Monteagudo, J. M., Durán, A., San Martín, I., & Acevedo, A. M. (2017). A novel combined solar pasteurizer/TiO₂ continuous-flow reactor for decontamination and disinfection of drinking water. *Chemosphere*, 168, 1447-1456.

Nebbia, S., Giribaldi, M., Cavallarin, L., Bertino, E., Coscia, A., Briard-Bion, V., ... & Deglaire, A. (2020). Differential impact of Holder and High Temperature Short Time pasteurization on the dynamic in vitro digestion of human milk in a preterm newborn model. *Food Chemistry*, 127126.

Omer, A. M. (2010). Environmental and socio-economic aspects of possible development in renewable energy use. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 2(1), 001-021.

Ruocco, G. (2018). *Introduction to Transport Phenomena Modeling: A Multiphysics, General Equation-Based Approach*. Springer.

Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics—A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128-138.

Stinco, C. M., Sentandreu, E., Mapelli-Brahm, P., Navarro, J. L., Vicario, I. M., & Meléndez-Martínez, A. J. (2020). Influence of high pressure homogenization and pasteurization on the in vitro bioaccessibility of carotenoids and flavonoids in orange juice. *Food Chemistry*, 127259.

Stratakos, A. C., Delgado-Pando, G., Linton, M., Patterson, M. F., & Koidis, A. (2016). Industrial scale microwave processing of tomato juice using a novel continuous microwave system. *Food chemistry*, 190, 622-628.

Van der Spek, M., Ramirez, A., & Faaij, A. (2017). Challenges and uncertainties of ex ante techno-economic analysis of low TRL CO₂ capture technology: Lessons from a case study of an NGCC with exhaust gas recycle and electric swing adsorption. *Applied Energy*, 208, 920-934.

CHAPTER 3:

Optimal design of an innovative microwave-based plate heat exchanger

Research question 3: Which is the potential of BCET technology?

Este estudio ha dado como resultado una publicación enviada a la revista "International Journal of Thermal Science", que se encuentra en segunda revisión.

Los resultados de este estudio fueron obtenidos en la estancia que el doctorado realizó durante 4 meses en la Università degli Studi della Basilicata, bajo la tutorización de Gianpaolo Ruocco.

ABSTRACT

New heating technologies are constantly being developed worldwide, specially the electrical ones that take advantage of renewable energy. In this paper, the Basic Cell of Energy Transference (BCET) is proposed as an innovative heat exchanger, carrying a microwave-fed heat transfer plate for thermal contact. A fullydimensional thermo-fluid analysis was implemented and validated to determine the key design parameters and operation features for heat transfer to temperature-sensitive working fluids.

Circulation patterns were observed, when using certain fluids, in turn causing strong temperature nonuniformities. As fluid treatment in the heat exchanger relies on the thermal contact at its active plate, the model was used to ascertain the undesired excess/lack temperature range for quality/safety treatments, with reference to a final effective process temperature. Therefore, a geometry optimization by means of internal baffes was carried out which ensured variation to fluid pattern and more uniform active plate temperature. In a base case, the new design limited the uncontrolled temperature excess by about 20%, favoured the pressure drop across the flow device by reducing it by almost 160 Pa.

Key words: Fluid Heater, Computational Fluid Dynamics, Microwaves

RESUMEN

Constantemente se desarrollan nuevas tecnologías de calentamiento en todo el mundo, especialmente alimentadas por electricidad, que pueden aprovechar las energías renovables. En este capítulo, la Célula Básica de Transferencia de Energía (CBTE) se propone como un intercambiador de calor innovador, que lleva una placa de transferencia de calor alimentada por microondas para el contacto térmico. Se implementó y validó un análisis de termofluido para determinar los parámetros de diseño clave y las características de operación para la transferencia de calor a fluidos de trabajo sensibles a la temperatura.

Se observaron patrones de circulación, cuando se utilizaron ciertos fluidos, lo que a su vez provocó fuertes faltas de uniformidad de temperatura. Como el tratamiento del fluido en el intercambiador de

calor se basa en el contacto térmico en su placa activa, el modelo se utilizó para determinar el rango de temperatura de exceso / falta no deseado para tratamientos de calidad / seguridad, con referencia a una temperatura de proceso efectiva final. Por lo tanto, se llevó a cabo una optimización de la geometría mediante deflectores internos que aseguró la variación del patrón de fluido y una temperatura de la placa activa más uniforme. En un caso base, el nuevo diseño limitó el exceso de temperatura incontrolada en aproximadamente un 20%, favoreció la caída de presión a través del dispositivo de flujo al reducirla en casi 160 Pa.

Palabras clave: calentador de fluidos, dinámica de fluidos computacional, microondas.

INTRODUCTION

Nowadays, new heating technologies are being developed all around the world, specially, technologies that can be feed with electricity. Over the past two decades, rapid growth in the development of adaptation responses to climate change has occurred around the world (Owen, 2020). Therefore, the interest in the electrical-feed heating in common processes (such as in the food industry) has risen considerably as it can take advantage of renewable sources of energy, and as it has far less associated CO₂ emissions than the fossil fuels technologies. Process heating is an area of interest for emission reduction as the 70 % of the total energy cost of some sectors of the food industry comes from heating processes (Ladha-Sabur, 2019).

There are many novel technologies that can be used for heating applications and, specifically, to heat liquids, like ohmic heating (Makroo et al., 2020), irradiation (Roberts, 2016) or microwave (MW) (Ekezie et al., 2017). One such example is the Basic Cell of Energy Transference (BCET) (Fernandez et al., 2015), which consists, in its simplest configuration, in two flow boxes interspersed by an active heat transfer plate. The working fluid flows sequentially through the two box, making thermal contact with the active ceramic plate, which is heated by conducted MW. Due to its specifically-designed composition and dimensions, optimized to absorb MW, the active part of the BCET provides precise, efficient and flexible operation to

heat fluids in a similar way than a Plate Heat Exchanger (HEX) the most widespread device for heating fluids industrially (Fellows, 2009). Thanks to its compact design and working simplicity (no auxiliary fluid is necessary), it finds its application for precise liquid thermization and in rural areas installations, that can benefit of solar- or wind-driven energy and cannot depend upon a regular water supply. Its feeding technology allows for precise hold-up times, e.g. for pasteurization processes (Agcam et al., 2018; Deeth & Lewis, 2017) and finely-tuned power modulation from the active plate, e.g. with oscillating\periodic heat flux as in nanofluids thermization (Zhang & Ma, 2008), which requires more immediate response to temperature changes.

HEX design optimization is still an active area of research an development. Recently, (Yang et al., 2014; Picon-Nuñez et al., 2013; Caputo et al., 2008) confirmed that the pressure drop is correlated with the heat transfer coefficient, which is the key concept at stake here. While higher heat transfer contact and removal from the active plate (or HEX efficiency) is ensured by turbulent flow conditions, laminar flows are preferred instead to decrease the cost associated with pumping power (Ricci et al., 2014). On the other hand, the increment of HEX efficiency, for a given active surface area, may lead to a more affordable device, due to the reduction of material employed, unless the HEX design implies a greater burden in maintenance.

A variety of HEX modeling tools are available, that emerge from the literature, as genetic algorithm, differential evolution, particle swarm optimization or simulated annealing have become widespread for their application in design and optimization. Campet et al (2020) optimized a single-started helically ribbed HEX by using large eddy simulation, which is based on a surrogate model constructed from Gaussian Process Regression and adaptive resampling with the Efficient Global Optimization (EGO) method. This method can maximize the heat transfer efficiency but has the disadvantage that only is able to compare for the same pumping power, while not has the capacity to compare different flows. Kumar et al (2020) stated that multi objective wale optimization was a suitable method to optimize the constructive parameters of a plate HEX, basing it in decreasing the pressure drop, but could not perform a multivariable analysis. HEX design takes into account many variables, so, a method

that can consider all, or at least some of them, would have a better success. With the development of computational technologies, also computational fluid dynamics (CFD) approaches are becoming popular in design and optimization. CFD approaches are attractive for testing the performance of any number of new designs without fabricating prototypes. Pressure and temperature distributions, flow behavior and pattern can be fruitfully explored in any number of virtual scenarios, which gives a huge amount of possibilities and optimizing at several variables at the same time, while the results only differ up to a 1.05% of the experimental ones (Abeykoon, 2020) For this approach, it is important to note that CFD has also been used for optimize novel designs of HEX, as Bicer et al (2020) optimized the design of a shell-and-tube HEX with novel three-zonal baffle by using ANSYS and the Taguchi method. The alternative of ANSYS is COMSOL, a CFD program based on finite elements that is more direct than finite volume (Pepper & Heinrich, 2017).

The present work is aimed to model and optimize the BCET technology as a temperature-sensitive fluid heater. A fully-dimensional thermo-fluid analysis based on CFD, including inherent turbulence, has been implemented corresponding to a preliminary experimental rig. After proper validation with the theoretical temperature increments, the model was effective in determining:

- the variables space of the thermo-fluid dynamic problem;
- effective operation charts to consolidate the knowledge of the thermization performance;
- the ranges of this variable space that lead to heat transfer's uniformity along the active plate, also depending on the inherent fluid dynamic patterns and some common working fluid.

PROBLEM FORMULATION

In this chapter a prototype of fluid heater based on the BCET technology has been numerically studied. The prototype consisted in a double thermization flow box or control volume (CV), heated by an interspersed active BCET plate (as shown in Figure 3.1), connected by means of short PVC branches of 8 mm diameter. to a hold-up tank and a circulation pump (not shown). In this configuration, the liquid of given properties is pumped to the CV by means a short inlet pipe, and then out by an outlet pipe at the same side of the CV.

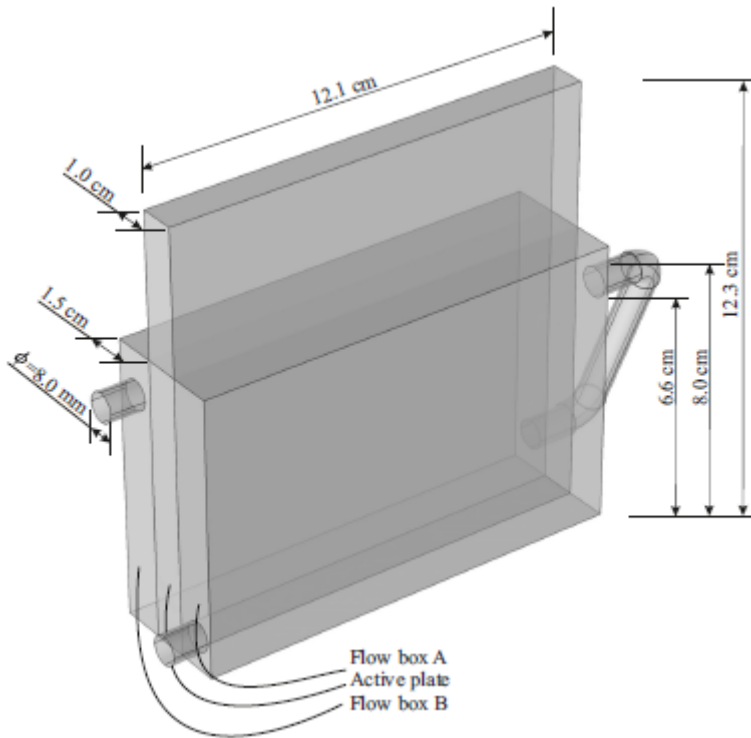


Figure 3.1 Configuration of the BCET prototype: two flow boxes (including their pipe connections) interspersed by the active plate.

BCET heating is performed by exploiting the ceramic plate properties, i.e. rapidly accumulating heat at before the actual flow circulation,

then releasing during flow contact. Details on the experimental rig are reported at chapter 2.

Driving assumptions

Based on the circulated operation described above, and the small characteristic length of the heat transfer geometry of the HEX at stakes (available flow volume divided by active heat transfer surface), a steady-state regime is assumed at each flow pass: the flow field (after a brief start-up transient) does not change during the process and a constant temperature field is established in the fluid.

The following additional assumptions are adopted:

- The flow is incompressible (negligible pressure work and kinetic energy) with temperature-dependent properties. Due to the adopted flow regime, no body force is accounted for.
- The viscous heat dissipation is neglected.
- All non-active wall surfaces are adiabatic.
- No slip is enforced at every solid surface.

Governing equations

With reference to the previous statements, the steady-state governing turbulent Reynolds-averaged Navier-Stokes and energy equations are enforced (Comsol, 2018), to yield for fluid flow and temperature:

- Flow continuity:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \quad (1)$$

- Momentum transfer:

$$\rho \boldsymbol{v} \cdot \nabla \boldsymbol{v} = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu}_t) [\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^T] \quad (2)$$

- Transfer of turbulent kinetic energy:

$$\rho \boldsymbol{v} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\boldsymbol{\mu} + \frac{\boldsymbol{\mu}_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \frac{\boldsymbol{\mu}_t}{2} [\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^T]^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

- Transfer of turbulent energy dissipation rate:

$$\rho \boldsymbol{v} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\boldsymbol{\mu} + \frac{\boldsymbol{\mu}_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{c_{1\varepsilon} \boldsymbol{\mu}_t}{2k} [\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^T]^2 - \frac{c_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

- Transfer of energy:

$$\rho c_p v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (5)$$

The present model is based on the k - ϵ low-Reynolds turbulence paradigm, with its details for turbulent viscosity μ_t and boundary layer at the wall (wall distance initialization) left unreported here for sake of brevity.

Boundary conditions

With reference to figure 3:

- Given conditions at inlet i:

$$V_x = v_i, \quad v_y = 0, \quad v_z = 0, \quad k = k_i, \quad \epsilon = \epsilon_i, \quad T = T_i$$

- At outlet o:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0 \quad v_y, v_z = 0 \quad \frac{\partial k}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0, \quad p = 0 \quad \nabla T = 0$$

- No slip at all flow box walls

$$v = 0$$

- No heat flux at all flow box walls except the active Surface:

$$\nabla T = 0$$

- Given heat flux at the active Surface

$$\nabla T = q$$

Numerical treatment

Integration of the partial differential equations system, along with its boundary conditions, was carried out. First, the direct MUMPS solver was employed for the wall distance initialization, with the automatic preordering algorithm and a relative tolerance of $1 \cdot 10^{-3}$; then the

direct PARDISO solver with nested multithreaded dissection and a relative tolerance of $1 \cdot 10^{-4}$ was invoked in a segregated fashion with row reordering and multithreaded forward and backward solve, to ensure computational stability and robustness: first for velocity and pressure, then for temperature, and finally for the turbulence parameters. A hexahedral grid of $109 \cdot 10^3$ total cells has been devised, featuring a boundary layer grid of 4 levels having a thickness of $5 \cdot 10^{-5}$ m. This allow for resolving the velocity and temperature gradients in the boundary layer, along all solid walls. A grid independency test was performed prior to generation of results, with a positive check on a $12.2 \cdot 10^3$ total cells and a boundary layer grid of 5 levels having a thickness of $3 \cdot 10^{-5}$ m. All tries of the grid independency test are shown at table 3.1. The computing time of each run took less than 1 h by using a Pentium Xeon server (Windows 10 OS, Eightcore-32N at 2.4 GHz, 128 GB RAM) running in serial mode.

Table 3.1: Grid independency test

	Domain elements	Boundary elements	Edge element	ΔT (K)	Nr BL	Thicknes
M0	57528	5902	416	1.47	3	1E-4
M01	63266			2.38	4	5E-5
M02	69004				5	3E-5
M1	109288	10110	543	2.38		
M11	109288			2.38	4	5E-5
M2	1481223	33372	968	2.38		

Model validation

In order to considerably simplify the flow geometry, while focussing on BCET's nominal exchanged thermal power, one flow box was considered as the CV at hand, only, with its active heating surface $\$A\$$ at the side. In order to do this, flow box A of Figure 3.2 was modified with a length $L=24.2$ cm, to double A with respect to the

design of Figure 3.1 and simulate a complete fluid/active surface contact for a single flow pass.

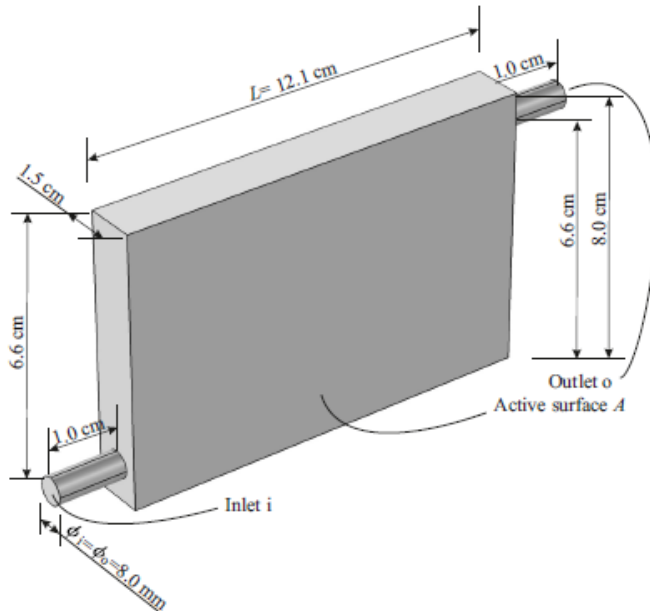


Figura 3.2 modified single flow box A

Since the working fluid is heated by a circulating operation in the BCET, the model of Eqs(1-10) is solved for the temperature increment of the working fluid $\Delta T_p = T_o - T_i$ after a single pass p (with T_o the average of T over outflow section area Ω_o , then multiplying for the total number of passes to yield for the cumulated thermization. Let us refer to an experimental Base Case for water, having supplied a nominal power provided at the active plate $qA=200$ W in a total process duration $\Delta t=1720$ s. With the total hold-up capacity $V=1.15$ L and volume flow rate in the flow box $V=2.0$ L/min measured micrometrically, a total number of flow passes $V \cdot \Delta t / V=49.85$ results. Denoting with ΔT_p^v the theoretical temperature increment in the CV, a control-volume energy conservation balance for constant fluid specific heat writes as:

$$qA = \rho V c_p \Delta T_p^v \quad (11)$$

yielding $\Delta T_p^v = 1.43$ °C, which corresponds in a cumulated $\sum_p \Delta T_p^v = 71.28$ °C. In the same conditions, a control-mass energy conservation balance applied to the entire BCET rig when holding the corresponding total volume $V = 1.15$ L of water, with a supplied nominal energy $E = qA\Delta t = 3.44 \cdot 10^2$ kJ, writes as

$$E = \rho V c_p \Delta T^m \quad (12)$$

yielding, in the additional assumption of negligible heat loss in the circuit, a cumulated $\Delta T^m = 71.46$ °C $\approx \Delta T^v$. By itself, this agreement confirms the correspondence of the V and V measurements in the experimental rig, but also gave the opportunity to validate the model. Indeed, in these prescribed conditions, the present BCET model gave a computed temperature increment $\Delta T_p^c = 1.36$ °C, yielding a cumulated $\sum_p \Delta T_p^c = 67.8$ °C, corresponding to an error of about 5 % with respect to the theoretical temperature increments.

RESULTS AND DISCUSSION

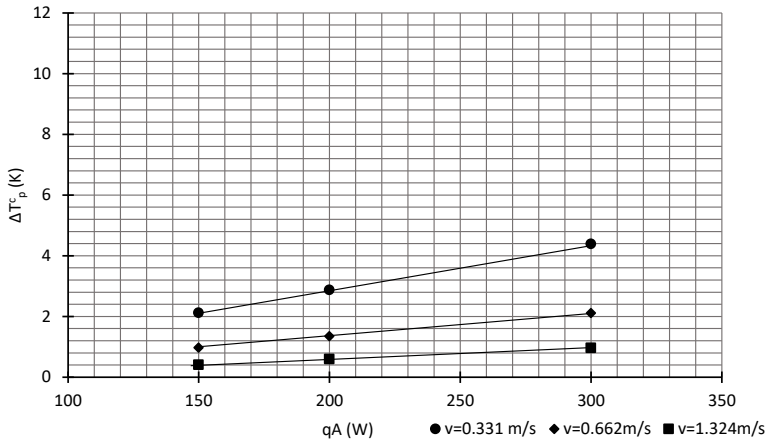
Variable space

For a given BCET geometry as in Figure 3.1 and with reference to the model in Eqs(1-10), the governing parameters are the power applied to the active plate q_A (from 100 to 300 W), the inlet velocity v_i (from 0.331 to 1.324 m/s, i.e. a range obtained by scaling the V of the Base Case), and the fluid type (water, milk of average characteristics, or common sunflower oil). The variables space have been explored building a full factorial set of computational experiments, for a total of 27 runs. Inlet temperature T_i was always kept at 21 °C, while the inlet turbulent kinetic energy k_i and turbulent energy dissipation rate ϵ_i were always consistent with the employed turbulence paradigm. When using the lowest inlet velocity value, model compliance was also checked when using a laminar form of the fluid dynamics, which compared nicely with the turbulent form.

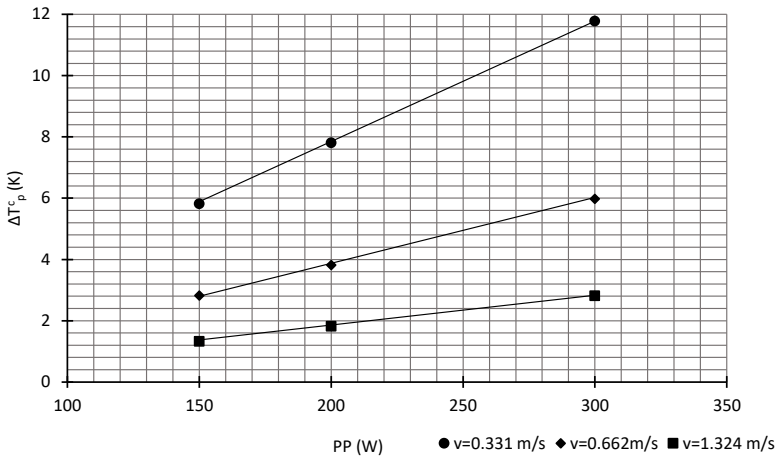
Operating charts and temperature distribution

Single-pass temperature increases ΔT_p^c are shown in Figure 3.3 for the single flow box of figure 3.2 and can be used to implement the desired thermization. Taking into account of the variation of fluid properties with temperature, ΔT_p^c appears to linearly progress with the increase of the plate power, while depends inversely on the working fluid specific heat and inlet velocity (or mass flow rate). Relative to the Base Case, a full run of 50-pass sequence has been also performed, with the boundary condition of $T_{p,i} = \iint_{\Omega} T_{p-1,0}$ at each pass p , to ensure that the cumulated ΔT^c does depend linearly on the total number of passes.

Resultados



(a)



(b)

Figure 3.3 single pass temperature increase (ΔT) charts for the employed fluids (a) water and milk, (b) sunflower oil, depending on the power applied to the active plate qA for variable inlet velocity: circle: 0.331m/s; diamond: 0.662 m/s; square 1.324 m/s.

Temperature distributions for the flow adjacent to the active plate are shown in figure 3.4, for the three fluids employed. The areas in yellow report on higher temperatures with respect to the various shades of red. Water (Left), and milk (Right) to a lesser extent, showed a pronounced circulation pattern at the plate center, and a larger stagnation area corresponding to the upper leading box corner. This pattern is favoured by the dynamic viscosities of these two fluids, that are 1 order-of-magnitude smaller when compared to that of sunflower oil. These areas of uncontrolled, excess temperatures prevent precise thermal control and treatment uniformity at active plate vicinity. As fluid treatment in the heat exchanger relies on this thermal contact, the model was therefore used to optimize the single flow box of figure 3.2 in order to promote a more uniform temperature treatment, for the given external dimensions.



Figure 3.4 Qualitative fluid temperatura distribution adjacent to the active plate for the single flow box of figure 2 with $L=24.2$ cm, when $qA=200$ W and $v_i=0.662$ m/s (Base case). Left: water, Center: sunflower oil, Right: milk.

BCET optimization

When processing many heat-sensitive fluids, the undesired excess/lack temperature levels must be monitored, to ensure for proper quality / safety treatments: too high a temperature may readily spoil some functional feature, such as taste or vitamin content, whereas in turn too low a temperature would hinder the bacterial degradation (Toledo et al., 2007). Indeed, with the steady-state model at hand, for a given heat transfer characteristic length of the HEX, the same

amount of energy to the fluid is delivered regardless the internal configuration. In this paper, a simple modification is proposed to optimize the BCET prototype, or flow box of figure 3.2, by placing two equidistant thin baffles. Therefore, four additional runs for water in the Base Case were performed, for varying baffle lengths, to compare to the original configuration. These results will report on fluid foods that share with water some thermodynamic properties such as density and viscosity.

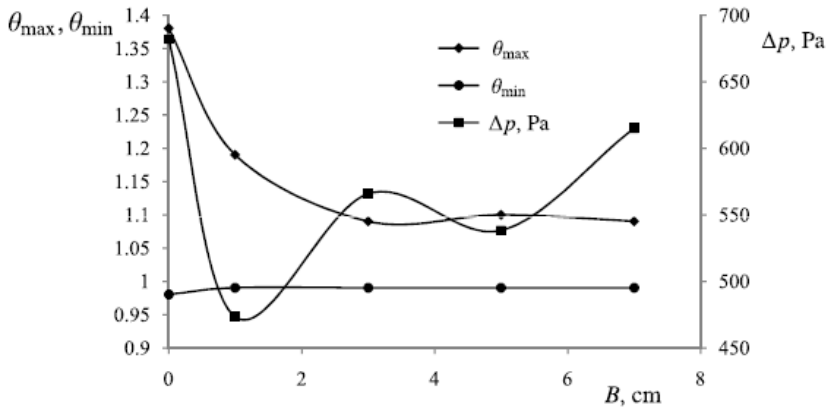


Figure 3.5 dimensionless temperatures θ_{max} and θ_{min} at the active plate (left axis), and head loss Δp [Pa] (right axis), as dependent of the length B [cm], for the Base Case and water.

The result of such comparison is reported for the Base Case in figure 3.5. To this end, the fluid maximum and minimum temperatures detected at the vicinity of the plate are compared to the volume average temperature in the CV, to define the following dimensionless temperatures:

$$\theta_{max} = \frac{T_{max}}{\iiint_{CV} T dV}; \quad \theta_{min} = \frac{T_{min}}{\iiint_{CV} T dV} \quad (13)$$

When plotting these θ s against the baffle length B , it is evident that there is no departure of safety treatment is induced in the BCET (the

minimum temperatures are kept regardless of B), while uncontrolled thermizations or strong excess temperatures in contact to the active plate will results when using two very short baffles of 1 cm, or no baffles at all. In particular, the progress of θ_{\max} decreases steadily up to the 3 cm-baffle design, then attaining a plateau with varying B. At the same time, head loss Δp was also computed and provided in the secondary y-axis of figure 5. Therefore, it is seen that the optimal baffled configurations are the ones with 3 or 5 cm-long baffles, the later one to be preferred as bringing forth a slightly smaller head loss.

Temperature plots for some runs reported on in figure 3.5 are also provided in figures 3.6 and 3.7, by plotting the temperature on the perpendicular axis against the cross-section of the flow box. First, in figure 7 the case with no baffles is depicted: it is found a very steep peak of temperature, corresponding to figure 3.4, Left (although now the flow box has a shorter aspect ratio, as in figure 3.2).

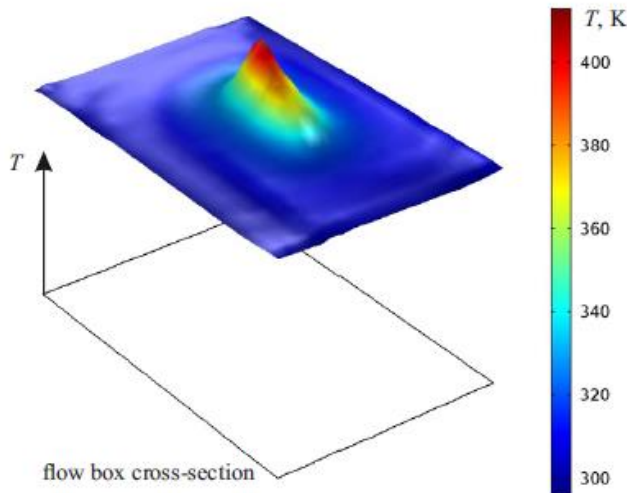


Figure 3.6 temperature excess for water and the Base Case, with no baffles, with its scale at right

When similar plots are provided with internal baffles, as in figure 7 against each modified geometry, it is evident how the very short

baffles at Left are still insufficient in ensuring a relaxed i.e. more uniform temperature distribution in the vicinity of the plate. The two cases at Center and Right, instead, present more adequate temperature shapes, while the biggest baffle case (7 cm) increases the pressure drop. So, baffles of 5 cm was the chosen option to reduce the overheating while decreasing the pressure drop with its associated increase of efficiency.

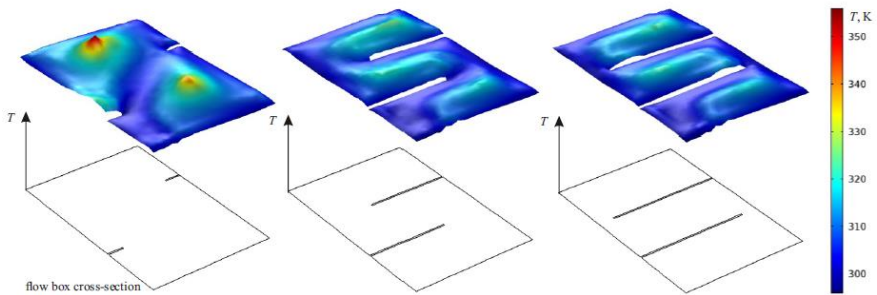


Figure 3.7 Temperature excess for water and the Base case, with two 1cm baffles (left), two 5cm baffles (center) and two 7cm baffles (right). The temperatura scale is provided at right.

CONCLUSIONS

In this chapter, a prototype of BCET technology was numerically studied and optimized. After validation, the original heat exchanger was modelled in 27 different conditions by varying the mass flow rate, the plate power and the fluid type to be heated.

The initial design of the prototype evidenced a pattern of lack of heating homogeneity, for fluids that have viscosities similar to water. As strong excess temperature could be harmful to fluid features, a new design with different baffle lengths (from 1 to 7 cm) was examined. The optimal length of the baffles was found as 5 cm, which limited the uncontrolled temperature excess by about 20 %, reduced the difference between the maximum and minimum temperature by about 75 %, and decreasing the pressure drop of the initial prototype configuration by almost 160 Pa.

NOMENCLATURE

A	Active surface area (m ²)
B	Baffle length (m)
$c_{1\varepsilon}$	Turbulence model parameter in Eq. (4)
$c_{2\varepsilon}$	Turbulence model parameter in Eq. (4)
c_p	Constant pressure specific heat (J/kgK)
h	Specific enthalpy (kJ/kg)
k	Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)
L	Length (m)
p	Pressure (Pa)
q	heat flux (W/m ²)
t	time (s)
T	Temperature (K)
v	velocity vector (m/s)
v	velocity component (m/s)
V	volume flow rate (m ³ /s)
X,y,z	coordinates (m)

Greek

Δt	process duration (s)
ΔT	temperature increment (K)
ε	turbulent energy dissipation rate (m ² /s ³)
λ	thermal conductivity (W/mK)
μ	Dynamic viscosity (Pas)
σ_k	turbulent model parameter in Eq.(3)
σ_ε	turbulent model parameter in Eq.(4)
θ	dimensionless temperature
Ω	section area (m ²)

Resultados

Subscripts

i	inlet
max	maximum at the plate
min	minimum at the plate
o	outlet
p	single pass
t	turbulent

Superscripts

c	computational
m	control mass
v	control volume

BIBLIOGRAPHY

Abeykoon, C. (2020). Compact heat exchangers Design and optimization with CFD. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118766

Agcam, E., Akyildiz, A., & Dundar, B. (2018). Thermal pasteurization and microbial inactivation of fruit juices. In *Fruit Juices* (pp. 309-339). Academic Press.

Bicer, N., Engin, T., Yasar, H., Buyukkaya, E., & Aydin, A. (2020). Design optimization of a shell and-tube heat exchanger with novel three-zonal baffle by using CFD and taguchi method. *International Journal of Thermal Sciences*, 155, 106417

Campet, R., Roy, P. T., Cuenot, B., Riber, E., & Jouhaud, J. C. (2020). Design optimization of an heat exchanger using Gaussian process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119264.

Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2008). Heat exchanger design based on economic optimisation. *Applied thermal engineering*, 28(10), 1151-1159.

COMSOL Multiphysics (2018) v. 5.2a. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Deeth, H. C., & Lewis, M. J. (2017). High temperature processing of milk and milk products. John Wiley & Sons.

Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.

Fellows, P. J. (2009). *Food processing technology: principles and practice*, Chapter 8 p. 520. Elsevier

Fernandez, J., Reyes-Davo, E., Reyes-Canovas, R., Garcia-Sevilla, J., Vela-Carrascosa, E., & Jara-Rico, A. (2015). Heating cell, heater using same, heating system and use thereof. ES2568749; PCT/ES,70712, 2015.

Kumar, S.D., Chandramohan, D., Purushothaman, K.,& Sathish, T., (2020). Optimal hydraulic and thermal constrain for plate heat exchanger using multi objective wale optimization. *Materials Today Proceedings*, 21, 876-881

Ladha-Sabur, A., Bakalis, S., Fryer, P. J., & Lopez-Quiroga, E. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 270-280.

Makroo, H. A., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2020). Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*.

Owen, G. (2020). What makes climate change adaptation effective? A systematic review of the literature. *Global Environmental Change*, 62, 102071.

Pepper, D. W., & Heinrich, J. C. (2017). *The finite element method: basic concepts and applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL*. CRC press.

Picon-Nuñez, M., Polley, G. T., & Martinez-Rodriguez, G. (2013). Graphical tool for the preliminary design of compact heat exchangers. *Applied thermal engineering*, 61(1), 36-43.

Ricci, R., Romagnoli, R., Montelpare, S., & Di Benedetto, D. (2014). Convective heat transfer increase in internal laminar flow using a vibrating surface. *International journal of thermal sciences*, 84, 358-368.

Roberts, P. B. (2016). Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiation Physics and Chemistry*, 129, 30-34.

Toledo, R. T., Singh, R. K., & Kong, F. (2007). *Fundamentals of food process engineering (Vol. 297)*. New York: Springer.

Yang, J., Oh, S. R., & Liu, W. (2014). Optimization of shell-and-tube heat exchangers using a general design approach motivated by constructal theory. *International Journal of heat and mass transfer*, 77, 1144-1154.

Zhang, Y., & Ma, H. B. (2008). Nonequilibrium heat conduction in a nanofluid layer with periodic heat flux. *International journal of heat and mass transfer*, 51(19-20), 4862-4874.

CHAPTER 4:

Entropy analysis of the system

Research question 3: Which is the potential of BCET technology?

A paper based on this study is being prepared and is expected to be sent to the International Journal of Thermal Science.

ABSTRACT

The irreversibility analysis of the processes has gained importance recently in order to maximize the energy used in heating processes. This chapter analyses, using simulation software, the prototype of a Basic Cell of Energy Transfer (BCET) fluid heater, from the point of view of the second law of thermodynamics. The entropy generated by heat transfer, and by fluid flow, has been analysed.

The analysis showed that the entropy generation associated with heat transfer exceeded that associated with flow by up to 4 orders of magnitude. The heat transfer component was directly proportional to the fluid outlet temperature. As for the entropy generated by the flow, it increased with the viscosity of the liquid and with the speed of circulation. The entropy generated by modifying the prototype with metal sheets was analysed that reduce the overheating of the fluid. The lamellae reduced the generation of total entropy, but the 1 cm lamella was the least irreversible option associated with flow.

Key words: entropy, fluid flow, microwave

RESUMEN

El análisis de irreversibilidad de los procesos ha ganado importancia recientemente, empleándose para maximizar la energía aprovechada en los procesos de calentamiento. En este capítulo se analiza, mediante un software de simulación, el prototipo de calentador de fluidos por tecnología CBTE, desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica. Se ha analizado la entropía generada con origen en la transmisión de calor, y con origen en la circulación de fluidos.

El análisis mostró que la generación de entropía asociada a la transferencia de calor superaba a la asociada al flujo hasta en 4 órdenes de magnitud. El componente de transferencia de calor fue directamente proporcional a la temperatura de salida del fluido. En cuanto a la entropía generada por el flujo, aumentó con la viscosidad del líquido y con la velocidad de circulación. Se analizó la entropía generada al modificar el prototipo con láminas metálicas que reducen el sobrecalentamiento del fluido. Las láminas reducían la generación de entropía total, pero las láminas de 1 cm eran la opción de menor irreversibilidad asociada al flujo.

Palabras clave: entropia, microondas,

INTRODUCTION

Heating processes are an area where many innovations and new developments are currently being carried. One of the most interesting and promising area of improvement are the heating sources that can be feed with electricity, due to the fact that the electricity can come from renewable energy sources. The interest in renewable energies has dramatically increased at recent years because of their absence of CO₂ or other contaminant emissions (Child et al., 2019). However, due to their characteristic intermittent availability (Shen et al., 2020), applying them at a large scale is a huge challenge.

To reach this objective, some novel technologies are being studied and developed, like microwave (Ekezie et al., 2017), ohmic heating (Makroo et al., 2020) or Ultra high hidrostatic pressures (Barba et al., 2015). For some specific conditions, one potential solution, specifically to heat fluids, is the Basic Cell of Energy Transference (BCET) (Fernandez et al., 2015) which is a technology that combines the volumetric heating typically associated to microwaves, being able to use it out of a closed chamber, with the high capability of store thermal energy of the ceramic materials. From a heat transfer point of view, in the current stage of development, BCET consists, in its simplest configuration, in two flow boxes interspersed by an active heat transfer plate.

Entropy generation is a magnitude that has been analyzed and optimized in many proceses form different sectors, like electrodyalisis desalination systems (Generous et al., 2020) or estimating the aging of bateries (Cuadras et al., 2020). Besides, since it was studied by Bejan & Krestin at the early 1980s (Bejan & Krestin, 1983), it is well known that it is one of the main factors that affect the performance of heating technologies, having a direct impact in the energy efficiency of the equipment during the heating processes. Studying the additional entropy generation is crucial to reduce it and

understand the adverse effects resulting in decreased energy efficiency. A common approach into calculating the minimal possible entropy generation, is called the exergy destruction of the system (Tame, 2019).

Many studies have been focused in the entropy generation of current fluid heating technologies, that is, heat exchangers. Zhang et al., (2020) established a numerical model correlating entropy generation and transient time for a heat exchanger, showing that the higher temperature difference and the lower fluid flow, the lower entropy generated. Similar study, but for a Shell-and-tube heat exchanger, was performed by Petinrin et al., (2018), showing that the diametre of the tubes was the most influential variable of entropy generation, the smaller the pipes, the les entropy generated. Mazaheri et al., (2019) analyzed a ribbed triple-tube heat exchanger operated with graphene nanoplatelets nanofluid and founded that increasing the rib height and rib pitch decrement reduce total entropy production of the nanofluid. This work, like some others (Bahiraee et al., 2018; Manjunath et al., 2020) show that the entropy and exergy analysis are being performed also in novel technologies like nanofluids or supercritical fluids.

To study the entropy generation of a given system, one of the most widespread tools are the numerical methods, that use the entropy generation governing equations of the whole system while correlating them with all variables (Biswal & Basak, 2017). A basic tool that works for simple system is EGA, a software designed to optimize processes, but it is considered a missuse to apply this tool to more complex systems (Oztop & Al-Salem, 2012). One of the most complex softwares between them, are the multiphysics softwares, like COMSOL, that uses finite elements (COMSOLAB) or ANSYS, that uses finite volumes (Fluent), because both of them can simulate at the same time the process in detail of a 3D model, applying different phisical processes (for the case of a heat exchanger, fluid dynamics and heat transfer) and use the entropy generation equations as governing equation, tracking their evolution.

The present work is aimed to analyse the entropy generation of a BCET prototype and its exergy destruction, while finding the optimal key parameters to reduce those magnitudes. To reach that objective, a fully-dimensional thermo-fluid analysis based on CFD, including inherent turbulence, has been implemented by using COMSOL.

PROBLEM FORMULATION

In this chapter, the entropy generated by a prototype of fluid heater based on the BCET technology has been studied. The prototype consisted, as mentioned in chapters 2 and 3, in a double flow box or control volume (CV), heated by an active BCET plate, connected by means of PVC pipes of 8mm diameter to a 1 L tank and a circulation. In this configuration, the liquid of given properties is pumped to the CV by means a short inlet pipe, and then out by an outlet pipe at the same side of the CV.

Driving assumptions

Based on the circulated operation described above, and the small characteristic length of the heat transfer geometry of the HEX at stakes as described in chapter 3, a steady-state regime is assumed at each flow pass: the flow field (after a brief start-up transient) does not change during the process and a constant temperature field is established in the fluid.

The following assumptions are adopted:

- The flow is incompressible (negligible pressure work and kinetic energy) with temperature-dependent properties. Due to the adopted flow regime, no body force is accounted for.
- All non-active wall surfaces are adiabatic.
- No slip is enforced at every solid surface.

Governing equations

With reference to the previous statements, the steady-state governing turbulent Reynolds-averaged Navier-Stokes and energy equations are enforced, to yield for fluid flow and temperature:

- Flow continuity:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

- Momentum transfer:

$$\rho v \cdot \nabla v = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu + \mu_t)[\nabla v + (\nabla v)^T] \quad (2)$$

- Transfer of turbulent kinetic energy:

$$\rho v \cdot \nabla k = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \frac{\mu_t}{2} [\nabla v + (\nabla v)^T]^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

- Transfer of turbulent energy dissipation rate:

$$\rho v \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{c_{1\varepsilon} \mu_t}{2k} [\nabla v + (\nabla v)^T]^2 - \frac{c_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

- Transfer of energy:

$$\rho c_p v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (5)$$

The present model is based on the k - ε low-Reynolds turbulence paradigm, with its details for turbulent viscosity μ_t and boundary layer at the wall (wall distance initialization) left unreported here for sake of brevity.

Boundary conditions

With reference to figure 3.2:

- Given conditions at inlet i:

$$v_x = v_i, \quad v_y = 0, \quad v_z = 0, \quad k = k_i, \quad \varepsilon = \varepsilon_i, \quad T = T_i$$

- At outlet o:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad v_y, v_z = 0, \quad \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \quad p = 0, \quad \nabla T = 0$$

- No slip at all flow box walls

$$v = 0$$

- No heat flux at all flow box walls except the active Surface:

$$\nabla T = 0$$

- Given heat flux at the active Surface

$$\nabla T = q$$

Numerical treatment

Similar as was performed in Chapter 3, integration of the partial differential equations system, along with its boundary conditions, was carried. First, the direct MUMPS solver was employed for the wall distance initialization, with the automatic reordering algorithm and a relative tolerance of $1 \cdot 10^{-3}$; then the direct PARDISO solver with nested multithreaded dissection and a relative tolerance of $1 \cdot 10^{-4}$ was invoked in a segregated fashion with row reordering and multithreaded forward and backward solve, to ensure computational stability and robustness: first for velocity and pressure, then for temperature, and finally for the turbulence parameters. A hexahedral grid of $109 \cdot 10^3$ total cells has been devised, featuring a boundary layer grid of 4 levels having a thickness of $5 \cdot 10^{-5}$ m. This allow for resolving the velocity and temperature gradients in the boundary layer, along all solid walls. A grid independency test was performed prior to generation of results, with a positive check on a $122 \cdot 10^3$ total cells and a boundary layer grid of 5 levels having a thickness of $3 \cdot 10^{-5}$ m. The computing time of each run took less than 1 h by using a Pentium Xeon server (Windows 10 OS, Eightcore-32N at 2.4 GHz, 128 GB RAM) running in serial mode.

RESULTS AND DISCUSSION

Entropy calculation

As the Basic Cell of Energy Transference (BCET) performs as a fluid heater which allows for precise and economical heating of heat-sensible fluids, a further research activity is its thermofluidic optimization based on Second Law of Thermodynamics. By using the CFD technology, it is possible to determine the distribution and intensity of entropy generation in the device, when subject to any variation of operating parameter. This research complements the activity carried over so far.

As stated by Bejan & Krestin (1983), the conventional way for improving the heat transfer in fluid heating systems is to increase the surface heat transfer coefficient, while improving the thermal contact increasing the least possible the fluid pumping power. This can bring to a conflict because, most commonly, increasing the thermal contact of the fluid has an associated increase of the pumping power. Analyzing it from the thermodynamic point of view, in quantitative terms, can bring to the optimal improvement.

The key concept when an analysis for the thermodynamic point of view is performed, is the entropy generation, which is a measure of the irreversibility of the process. As shown by Bejan (2013) and exploited, among others by Ruocco (1997) the total entropy generation was calculated by eq 1.

$$\dot{S}_{gen}''' = \dot{S}_{h.t.}''' + \dot{S}_{f.f.}''' = \frac{k}{t^2} \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{t} \cdot 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Here there are two irreversibility components, the first one due to non-isothermal heat transfer, and the second one due to fluid friction in a flow process. Both have been analyzed and compared for different conditions and variables.

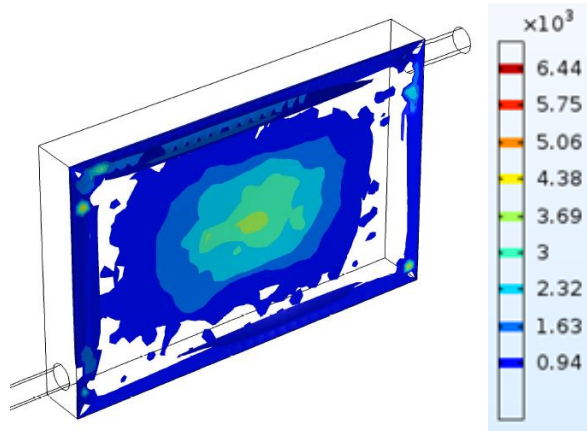
Conditions analysis

The entropy calculation Equation can be applied to COMSOL simulations performed in Chapter 3 to all its volume in order to calculate the generated entropy, in order to determine which parameter makes it increase or decrease it. So, modifications are made on mass flow rate, fluids (water and sunflower oil) and plate power (150 and 200 W) to analyse the correlations. Also baffle cases are analysed under the thermodynamic point of view. Results are shown at table 4.1.

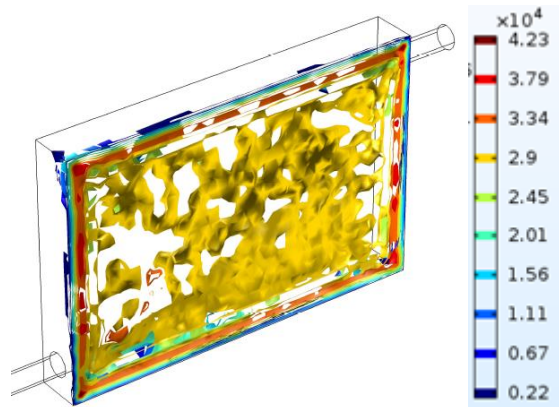
Table 4.1 entropy components generated in the analyzed conditions

Fluid	Plate power (W)	velocity (m/s)	Heat transfer component (J/K)	fluid flow component (J/K)
Water	200	0.331	0.032981	1.59E-06
Water	200	0.662	0.023008	8.50E-06
Water	200	1.324	0.014343	4.51E-05
Water	150	0.662	0.013239	8.53E-06
Oil	200	0.331	0.15527	1.70E-05
Oil	200	0.662	0.11941	7.84E-05
Oil	200	1.324	0.10136	3.82E-04

It has been found that the heat transfer component is up to 4 orders of magnitude higher than the fluid flow component. This component ranks from 0.013 to 0.15 W/K and seems to be directly related to the outlet fluid temperature of the described system in every condition. That is shown by the obtained values and by the distribution of entropy generation, and can be seen in the comparison between the water case (showed central overheating at the Chapter 3 analysis), and the oil case (did not show central overheating in Chapter 3 analysis). The central overheating is the point where the most entropy is generated, while at the oil case, the entropy generation is more homogeneous (Figure 4.1: (a) - water; (b) – sunflower oil).



(a)



(b)

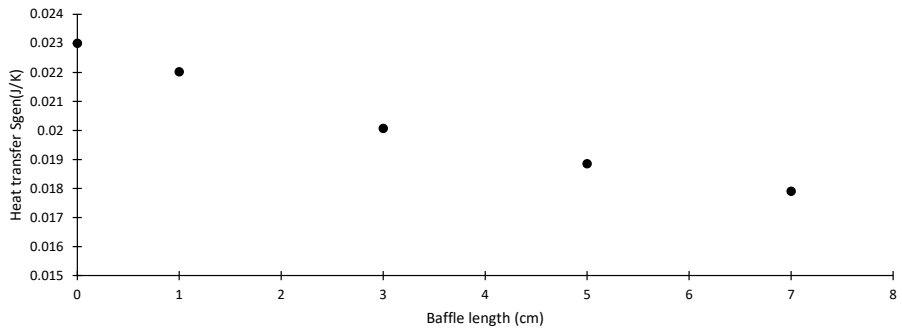
Figure 4.1 Entropy generation associated to heat transport in (a) water; (b) sunflower oil

On the other hand, the fluid flow transport showed to be independent of the plate power, as expected (results showed less than a 0.5% of variation by maintaining all conditions and just changing the plate power value). It was also acknowledged that it is directly proportional to the mass flow rate (the faster the fluid circulates, the more entropy is generated), and it was also

incremented with the value of the fluid viscosity, so the value obtained for sunflower oil was higher.

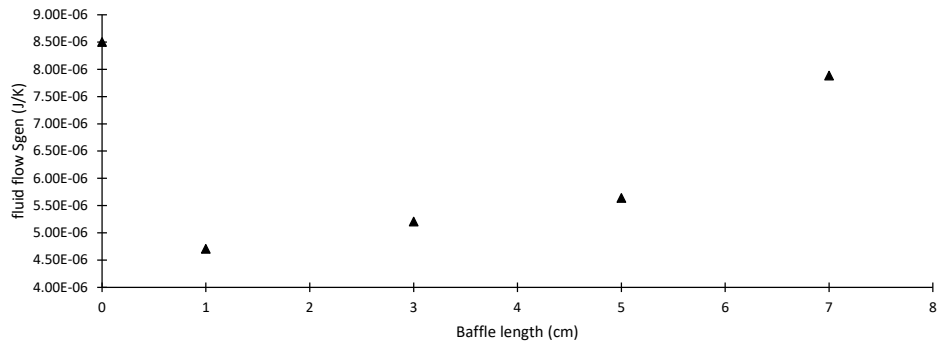
Optimization case

About the correlation between both components and the baffle cases, the heat transfer component, and, in that case, the total S_{gen} (as it is the largest contribution) was inversely proportional to baffle length (like there was less central overheating, as stated before). For the case of the fluid flow component, it showed to be less correlated to any of the considered variables, as shown in figure 4.2, as it decreased at the shortest baffle length, but then increased with the increasing length, but not arriving to be as high as with no baffles. It remains to analyze the evolution at the baffle cases and to find the optimal variable combination.



(a)

Resultados



(b)

Figure 4.2 Entropy generation vs baffle length for (a) heat transfer component (b) fluid flow component

CONCLUSIONS

In this chapter, a prototype of BCET technology's applications as fluid heater was analyzed from the point of view of the second law of thermodynamics. The generated entropy was calculated by varying the mass flow rate, the heated fluid and the power applied by the plate.

The analysis showed that the entropy generation associated with the heat transfer was larger than the one associated with fluid flow. The heat transfer component was directly proportional with the outlet temperature of the fluid. So, faster flow meant less heat transfer associated entropy, and, for the same reason, heating a fluid with less specific heat implied a higher entropy generation. About the entropy generated by fluid flow, it increased with the viscosity of the liquid and with the velocity of the fluid circulation.

It was also tested the entropy generated to the prototype modified with baffles that avoid central overheating. Baffles reduced total entropy generation, but, short baffles of 1 cm, were the option that less irreversibility generated considering the fluid flow.

BIBLIOGRAPHY

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, 2019

Bahiraei, M., Jamshidmofid, M., Amani, M., & Barzegarian, R. (2018). Investigating exergy destruction and entropy generation for flow of a new nanofluid containing graphene–silver nanocomposite in a micro heat exchanger considering viscous dissipation. *Powder technology*, 336, 298-310.

Barba, F. J., Terefe, N. S., Buckow, R., Knorr, D., & Orlien, V. (2015). New opportunities and perspectives of high pressure treatment to improve health and safety attributes of foods. A review. *Food Research International*, 77, 725-742.

Bejan, A. (2013). *Entropy generation minimization: the method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes*. CRC press.

Bejan, A., & Kestin, J. (1983). *Entropy generation through heat and fluid flow*.

Biswal, P., & Basak, T. (2017). Entropy generation vs energy efficiency for natural convection based energy flow in enclosures and various applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1412-1457.

Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2019). Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable Energy*, 139, 80-101.

COMSOL Multiphysics (2018) v. 5.2a. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Cuadras, A., Miró, P., Ovejas, V. J., & Estrany, F. (2020). Entropy generation model to estimate battery ageing. *Journal of Energy Storage*, 32, 101740.

Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality

and process efficiency A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.

Fernandez, J., Reyes-Davo, E., Reyes-Canovas, R., Garcia-Sevilla, J., Vela-Carrascosa, E., & Jara-Rico, A. (2015). Heating cell, heater using same, heating system and use thereof. ES2568749; PCT/ES, 70712, 2015.

Generous, M. M., Qasem, N. A., & Zubair, S. M. (2020). Exergy-based entropy-generation analysis of electro dialysis desalination systems. *Energy Conversion and Management*, 220, 113119.

Makroo, H. A., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2020). Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*.

Manjunath, K., Sharma, O. P., & Kaushik, S. C. (2020). Entropy generation and thermoeconomic analysis of printed circuit heat exchanger using different materials for supercritical CO₂ based waste heat recovery. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1525-1532.

Mazaheri, N., Bahiraei, M., Chaghakaboodi, H. A., & Moayedi, H. (2019). Analyzing performance of a ribbed triple-tube heat exchanger operated with graphene nanoplatelets nanofluid based on entropy generation and exergy destruction. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 107, 55-67.

Oztop, H. F., & Al-Salem, K. (2012). A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 911-920.

Petinrin, M. O., Bello-Ochende, T., Dare, A. A., & Oyewola, M. O. (2018). Entropy generation minimisation of shell-and-tube heat exchanger in crude oil preheat train using firefly algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 145, 264-276.

Ruocco, G. (1997). Entropy generation in conjugate heat transfer from a discretely heated plate to an impinging confined jet. *International communications in heat and mass transfer*, 24(2), 201-210.

Shen, W., Chen, X., Qiu, J., Hayward, J. A., Sayeef, S., Osman, P., ... & Dong, Z. Y. (2020). A comprehensive review of variable renewable energy leveled cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110301.

Tame, J. R. (2019). *Approaches to Entropy*. Springer.

Zhang, K., Liu, M., Zhao, Y., Wang, C., & Yan, J. (2020). Entropy generation versus transition time of heat exchanger during transient processes. *Energy*, 117490.

4. CONCLUSIONES

Conclusiones

RESUMEN Y CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

La primera fase de esta investigación (capítulo 1) se centró en optimizar la formulación cerámica para desarrollar una Célula Básica de Transferencia de Energía (CBTE), con el objetivo de maximizar la velocidad de calentamiento y minimizar la velocidad de liberación de calor. La formulación optimizada contenía un 50% de SiC como susceptor, siendo, el otro 50%, materiales habituales en formulaciones cerámicas refractarias. Esta cerámica se integró en un calefactor de 4 CBTE evaluándose el ahorro energético para calentar aire (48%) comparándolo con un calefactor con un calefactor convencional, alimentado por resistencias eléctricas.

En la segunda fase del proyecto (capítulo 2) se construyó y caracterizó un calentador de fluidos basado en tecnología CBTE. Tras tres iteraciones en el desarrollo, se consiguió diseñar un prototipo con una eficiencia energética del 45%, que es del orden de otros equipos de pasteurización. El sistema se evaluó para el calentamiento de diferentes fluidos alimentarios, pudiendo alcanzar en todos ellos, una temperatura de 80 °C. El prototipo de calentador de fluidos por CBTE alcanza velocidades de calentamiento similares a las de equipos que calientan fluidos por electricidad con potencias equivalentes. No obstante, con el objetivo de mejorar la transferencia de calor de la placa al fluido, se planteó el estudio del sistema mediante simulaciones multifísicas.

La tercera fase de la investigación se basó en la simulación multifísica del sistema. Se simularon las condiciones base, caudal, potencia y fluido tratado, que se habían experimentado previamente en el prototipo, así como otras condiciones teóricas. Se observó un sobrecalentamiento del fluido en su recorrido en contacto con la placa, que estaría relacionado con una heterogeneidad en el flujo en fluidos de muy baja viscosidad como el agua o la leche. Para solucionarlo, se optó por simular el efecto de la colocación de aletas de diferentes longitudes en el interior del circuito, para guiar el paso del fluido y evitar el sobrecalentamiento. Se consiguió una mayor homogeneidad de calentamiento con aletas de 5 cm, con menores pérdidas de presión, mejorando la eficiencia energética.

Por último, en la cuarta fase de la investigación (capítulo 4) se analizó la entropía generada por el sistema, por medio de simulación multifísica. Esto permitió diferenciar entre la entropía generada por

transmisión de calor y la generada por circulación de fluido, siendo la primera, del orden de 100 veces superior a la segunda. La entropía total se relacionó directamente con la temperatura de salida del fluido, lo que da pie a mejoras en el sistema para minimizar esta entropía y por tanto, mejorar la eficiencia energética.

CONCLUSIONES GENERALES

- La tecnología CBTE presenta unos resultados prometedores para aplicarse en el campo de la pasteurización, habiendo mostrado un potencial para ser competitiva frente a los combustibles fósiles.
- Se requieren modificaciones y pruebas para alcanzar un estado de desarrollo completo del equipamiento, que permita ofrecer la eficiencia energética de la que esta tecnología es capaz, tratando caudales de producto a nivel industrial.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Perspectivas futuras

PERSPECTIVAS FUTURAS

Los resultados de la investigación que conforman la presente tesis podrían tener impacto en el ámbito de la ciencia, tecnología y gestión alimentaria. El conocimiento generado puede dar lugar a una aplicación industrial en el campo del calentamiento de fluidos, como por ejemplo la pasteurización, constituyendo una alternativa al uso de gas o combustibles fósiles. Sin embargo, todavía es necesario continuar los estudios para que esta tecnología esté adecuadamente implementada a nivel industrial y pueda llegar al mercado.

Los estudios que llevar a cabo en un futuro pueden dividirse en estudios de carácter científico-técnico, y estudios de carácter empresarial.

Estudios de carácter científico-técnico

En el momento de finalización de la presente tesis, se dispone de un prototipo a escala de laboratorio, validado en un entorno controlado, lo cual sitúa la tecnología en un TRL 5. También se ha realizado la simulación para optimizar la homogeneización térmica del líquido, y conocer la variación entrópica generada por esta tecnología.

Para aumentar la capacidad de calentamiento del equipo hasta poder abordar un proceso a nivel industrial, se propone emplear un mayor número de CBTEs, análogamente a lo que ocurre en los intercambiadores de placas tradicionales. Este proceso, deberá ser, primero simulado y optimizado, y después verificado experimentalmente, para demostrar si el incremento de la capacidad de calentamiento es lineal con la potencia empleada en todo momento. Con esto, se podría calcular el coste energético real de la tecnología, y compararlo con las alternativas presentes en el mercado.

De igual forma, a nivel de investigación, se podrían llevar a cabo simulaciones y modelizaciones más profundas del sistema, simulando el funcionamiento completo de la CBTE y no sólo desde el punto de vista de la transmisión de calor al fluido. Esto permitiría combinar

conocimientos de microondas, termodinámica, dinámica de fluidos y materiales. Además, también se pueden usar las mismas herramientas, de simulación multifísica, para simular, y reducir al máximo, los efectos del fouling, fenómeno descrito en la introducción de la tesis, y así optimizar futuros procesos de limpieza en equipos de mayor tamaño a desarrollar. En este momento, se está ya trabajando en esta línea pero no se disponen de suficientes conclusiones por lo que no ha sido incluido en esta tesis.

Estudios de carácter empresarial

Una vez terminados los estudios técnicos y conocida la eficiencia energética y las ventajas en el marco de la economía circular y el respeto al medioambiente, se deberán fijar los clientes objetivo. Estos serán, en primera instancia, empresas interesadas en reducir su impacto ambiental.

Además, se deberá buscar la mejor forma de llevar a cabo el proceso de fabricación (seleccionar componentes en base a su coste, adquirir las instalaciones, subcontratar, etc) todo esto, asegurando el cumplimiento de todas las especificaciones de seguridad industrial necesarias, las cuales podrán variar según el mercado objetivo.

Estrategia de protección de resultados

Por último, deberá analizarse la forma de proteger el conocimiento generado. A principios de 2020 se ha concedido la solicitud de patente europea EP3133348B1, que ha sido validada en Alemania y Francia. Esta patente, además, reclama la prioridad de la patente nacional ES2568749A1, concedida mediante el Procedimiento General de Concesión de la LP 11/86. Por ello, la estrategia a seguir debería basarse en proteger el equipo desarrollado mediante otros métodos, como por ejemplo modelos de utilidad o secreto industrial, extendiéndolo en España y/o a nivel internacional.

ANEXOS

SOLICITUD H2020 SME INSTRUMENT

COVER PAGE

Title of Proposal Intelligent low-consumption heating system that can be integrated into a home: Dielectric Smart Heater

Acronym: SmartHeat

Participant No	Participant organisation name	Country
1 (Coordinator)	Microbiotech S.L.	Spain

Table of Contents

EXECUTIVE SUMMARY1

1. EXCELLENCE2

 1.1 CHALLENGE AND SOLUTION.....2

 1.2 APPROACH.....2

2. IMPACT5

 2.1 MARKET5

 2.2 BUSINESS MODEL6

 2.3 FINANCING8

 2.4 INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT (IPR) AND LEGAL FRAMEWORK8

3. IMPLEMENTATION9

 3.1 TEAM9

 3.2 WORK PLAN – WORK PACKAGE AND DELIVERABLE9

 3.3 RESOURCES10

EXECUTIVE SUMMARY

Microbiotech is a technology-based company that is dedicated to design and manufacture microwave industrial equipment. It has made the R+D+i its signal of identity by taking part in some national R+D projects and making sure that all the equipment that produces has an innovative value proposition.

In this framework, it was noticed that 68% of final energy consumption in buildings of the domestic sector in Europe corresponds to heating (in Spain this amount is up to 47%). The systems that reduce the heating expense, fit with the challenge in ENERGY SAFE, EFFICIENT AND CLEAN, of H2020. Within the framework of this challenge, Microbiotech has developed with its own funds the prototype of intelligent low-consumption heating system that can be integrated into a home.

At the whole Mediterranean region, there are 28 million household that need to be heated during, approximately, 4 months a year. Currently, ceramic and electric heaters are being used because higher initial investment-needed heating methods are not profitable. Those kinds of heaters have a very low energy efficiency and a short lifetime. Microbiotech has designed the **Dielectric Heater**, a breakthrough that can be sold, potentially to every household of the Mediterranean weather (or similar weather areas in, e.g. China and EEUU) and reduce drastically the energy bill due to domestic heating. (The protection of the intellectual property has already been made by patenting it).

Dielectric Heater is an appliance that will substitute the domestic electric heaters. It combines our recent breakthrough in microwave's technology, which allows them to be applied safely out of the cavity, and the thermal inertia of ceramic heaters. All these innovations supported by an optimized thermodynamic design, which gives it an energy efficiency more than 70% higher than conventional domestic heater and its consequent reduction of the energy bill. It can be installed as a household appliance, or as a radiant panel in the wall. That reduction in the use of energy could fight against a huge problem like energy poverty. This is an important problem because up to 15.000 people died in winter 2016 because of an inadequate heating. It will be done by benefiting of the scale economy and the improvement of the components and its prizes.

Our device is at a TRL 6, having the minimum viable product tested in laboratory conditions, it has to be tested in a real environment to reach TRL 7, and in a time as short as possible, achieve the mass production capacity. The necessary providers are Vicar, for the ceramic components and Ampleon for the microwave power amplifiers (developed

in a recent technology with some advantages called S2DH) the agreements with both have already been signed. To provide salesforce, Microbiotech has signed an agreement with a manufacturer and distributor, SaveHeat.

Microbiotech is a company formed by experts in four different areas: economics and business development, thermodynamics, telecommunications specialized in microwave, and ceramics. All of them have PhDs in their area of knowledge and a wide career with lots of contacts in the industry. Also mentoring from some experts in startups acceleration and business development in the framework of EIT's Climate KIC has been received.

Funding is requested to improve our knowledge of our potential customers and final users, of competitors, and the legal framework. Also, some studies about the feasibility of the fabrication process have to be done to ensure its final prize and profitability.

1. EXCELLENCE

1.1 Challenge and solution

Challenge

The high consumption of energy in heating is a problem that is even bigger in Mediterranean weather-located households, where is not profitable to install truly efficient but more expensive heating systems. More specifically, 68% of final energy consumption in buildings of the domestic sector in Europe corresponds to heating¹ (in Spain this amount is up to 47%), followed by spending on domestic hot water (27.4%), which indicates that thermal installations (heating and hot water) they represent almost three quarters of the sector's energy consumption, which in turn represents 17.5% of national energy consumption. The systems, that reduce heating costs, fit perfectly with the "CHALLENGE IN SAFE, EFFICIENT AND CLEAN ENERGY".

Microbiotech solves the problem by having developed within the framework of this challenge a prototype of intelligent heating system of low consumption that can be integrated into a home. This system has the best energy efficiency of any other electric heater in the market. Against other alternatives it saves space because it does not need boilers or any other auxiliary installation, what also makes it safer eliminating possible gas emissions.

Market Opportunity

In the Mediterranean area, like Greece or Spain, about 20% of homes are heated by electric radiators based on electric resistor heaters and oil heaters (with or without ceramic components). The former has a lower initial cost while the latter are slightly more energy efficient. Those systems have in common that are two of the most inefficient heating systems on the market². To the point that it is estimated that the cost of heating of a two-bedroom home per year with those heaters, assuming that heating is only required 4 months a year, is 790 euros per year. The initial investment is low, but it also must be kept in mind that you have to renew them often because they have a short lifetime. This generates a huge waste management problem because, according to European Commission, up to 12 million waste tones³ from this source are expected by 2020.

Faced with this, the dielectric heater presents energy savings and therefore a reduction of the electricity bill of 70%. This entails a reduction of the CO₂ emitted by generating electricity of 740 kg per household each year. This gives us a potential to reduce emissions of 35,000 tons only in Spain (equivalent to 27,100 cars being driven a year).

Another category of homes that have the problem of the energy inefficiency are the second residences, where their owners stay for a short time. In these homes it is not worth making the initial investment that requires more efficient heating systems, such as biomass or central heating.

It is for the reasons cited above; that Microbiotech strongly believes that there is an opportunity in the market, which is the technological challenge of designing a heating system that is economically viable in areas and houses where it is only necessary in winter time. And, if possible, that system should be respectful with the environment.

Objectives

Funding is requested to validate the choice of our beachhead market, the assumptions and the information we have about that market, and with that information, make a go, no-go decision for each market. Funding is requested also, to ensure that the legal framework is not an impediment to the successful commercialization of the dielectric heater. In addition, some studies about the feasibility of the fabrication process have to be done to ensure its final prize and profitability.

1.2 Approach

State of the art

Temperate climate zones in Europe have been characterized by using portable heating devices, known as electric radiators. This happens because of the big thermal variation during the year. What is unique in this solution is that it offers huge versatility and installation savings. Evidently, in those countries in the centre of Europe under-floor heating

¹ <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling>

² https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cpe/c-dam/documents/research/cpe-wp/CEPE_WP82.pdf

³ http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm

systems are really extended, but in countries as Spain, Portugal, Italy and even some parts of France, large number of households have electric radiators.

These heaters require huge quantity of contracted power. It is a common problem in these areas that the differential switch strikes because of the amount of high power devices connected to the net. Furthermore, consumption prices in winter periods can be too high due to the constant high power consume.

To sum up, two main methods exist currently: resistor heaters and oil heaters. First one method consists on feed various resistors that heat up the air surrounding. The problem is the fast cooling of the air. Second method adds an oil surrounding the resistors, this oil heats up the confining metallic body which maintains the temperature.

Innovative solution

The heating system is based on the dielectric heating of technical ceramics (doped with subceptors) using planar microwave technology. When Microwaves are applied to the technical ceramics, they raise its temperature quick and efficiently. The microwave energy absorption into the technical ceramics produces a non-reciprocal behaviour as it is showed in figure 1. Ceramics conventionally heated (brown) raise and down its temperature in same rate (about 0,26°C/s), while the **Dielectric heater** (green) heats quickly (about 5 °C/s) and removes the heat slowly (about 0,26°C/s). The great novelty is that Microwaves are conducted by a cable to the plate of ceramic material to be heated. This is an innovative way of applying microwaves outside of a closed cavity in safety conditions for the user or the operator.

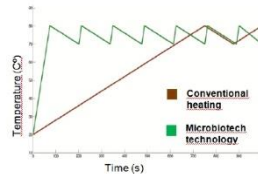


Figure 1: Comparison of the speed of reaching operating temperature

Applicators are specifically designed to achieve maximum efficiency (all the power is absorbed by de ceramic material). Microbiotech owns the patented the safe and optimal power application to ceramic materials using planar microwave technology to heating applications (ES2568749 → PCT/ES2015/070712)→ applied EP 15848187.1, N/Ref. EP1641 995. (Figure 2 shows the first tested prototype, BCET = Basic Cell of Energy Transference).

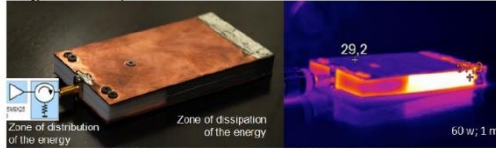


Figure 2 first tested prototipe, BCET = Basic Cell of Energy Transference

Electromagnetic waves technology, have been improving gradually last few years, but now it is the moment to take maxim advantage of it because of the appearance and establishment of solid-state amplifiers that allow solid state microwave heating (S²MH). Solid state amplifiers are called to substitute magnetrons and other valves. This is because the new S²MH features include frequency and phase variability and control, low input-voltage requirements, compactness and rigidity, reliability, and better compatibility with other electronic circuitry (and with the Internet-of-Things in the future). It also offers infinitely better useful life than magnetron (see figure 3).

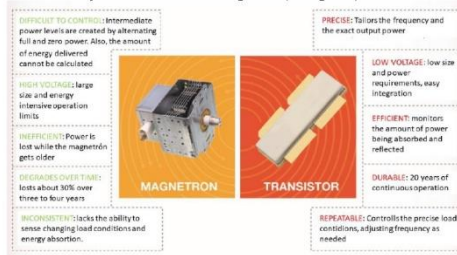


Figure 3 comparison between a magnetron and a S2DH transistor⁴

⁴http://rfeenergy.org/sites/default/files/RFEA_Microwave_Infograph.jpg

S²DH offer a huge range of possibilities unfeasible until now as the example of our domestic heater. The new technology allows us to do of our domestic heater a compact and efficient device. Their lower size is the decisive question because allows us to think about the domestic heater as a decorative product, like a picture or a painting, making the room a welcoming environment and providing a non-destructive aesthetic heating. This could be a modification for a higher income targeted market. Moreover, the power and efficiency supplied by S²DH amplifiers are increasing more and more while the costs are decreasing due to the cheapening of the components and the benefits of the scale production (see figure 4).

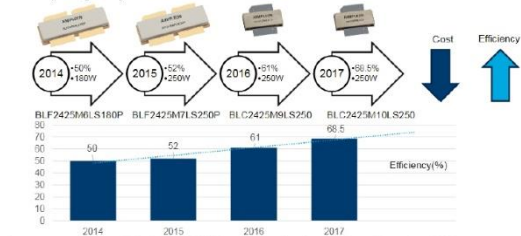


Figure 4 Evolution of S²DH amplifiers (Apleon webinar November 2017)

Another advantage of the dielectric heater is that by requiring much less electricity and reaching the temperature very quickly. Thus our technology could be combined with a smart heating program in order to go on and off in a coordinated way the equipment of the different rooms of the household (even from an App). In this way there will only be one lit at any time, and thus the need for power contracted at home can be reduced as it is showed in figure 5. Such an approach offers a novel solution in the framework of internet of the things (IoT).

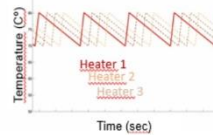


Figure 5: capability of the heater to be combined and take advantage of their thermal inertia

Microbiotech has identified as its beachhead market houses of temperate climates inhabited by middle class people capable of investing in a design domestic appliance with high energy-saving and ecofriendly features. The cost of the equipment will be established to be amortized in less than two years by the energy saving that supposes.

Advantages against rest of competitors are evident:

- The consume time is lower due to the small amount of energy that is necessary to supply to reach again the operation temperature (as showed in figure 1).
- Lower contracted power: we can coordinate every heater of the net in order to attune them and prevent from high power peaks.

The final design of the equipment is very important for their probable application as decoration, so the useful time of the components have to be kept in mind in order not to damage the design done by interior designers and decorators. Now is the moment to implement this solution because the power and efficiency supplied by S²DH pallets are increasing more and more while the costs are decreasing due to the cheapening of the components and the benefits of the scale production (see figure 5)

Current state

Some milestones have been achieved by our company yet. The technology was patented and validated; a 300w prototype was tested on a relatively relevant scale (in controlled conditions in a closed chamber). It achieves energy savings of around 70% compared to current electric ceramic heaters, thanks to the high thermal inertia of the ceramic material to be heated with microwaves (Analysis performed with the energy certification program Ce3X). This makes it perfectly responsive to the technological challenge of efficient heating in temperate areas, where biomass or gas heaters are not a need.

Moreover, Microbiotech has made an improved prototype in which, energy applied will be supplied by a solid-state amplifier. The solid-state microwave heating (S²MH) technology offers several advantages over magnetrons, in various microwave



Figure 6: Current state

heating applications. With the agreement recently made with SaveHeat, another way of applying it has been developed, as a radiant wall.

Currently, Microbiotech has a prototype at technical scale, which has been validated in a relevant environment, obtaining energy savings of more than 70% in a standard house in temperate climates (Analysis performed with the energy certification program Ce3X). This places it at a TRL of 6.

Milestones and objectives

Microbiotech's priorities are the nexts:

1. Achieve TRL 7 by making it able to be tested at a real environment. This will be achieved a second residence (located in the Valencia region) which will give us a place to install and validate a first prototype.
2. Acquire a prescripctor, that could be a architecture studio or a interior designer, which will make us close the first sales. The first units will be manufactured by SaveHeat. We have a letter of interest from Nuevas Estrategias Urbanísticas, an architecture studio from Valencia.
3. Once the first sales have been closed, the manufacturing capacity will have been increased. An agreement with a big supply chain will be made to act as a distributor.
To achieve that milestone, Microbiotech is joining the RF Alliance, an agrupation that aims to make the S'DH applications mainstream, and many important potential distributors have enrolled in it. One of the objectives of the feasibility plan is to analyze all members of the RF Alliance and seek which one could be our distributor in Europe. Application of the phase 2 of SME's H2020 will be considered to accelerate the process of acquiring manufacturing capacity.

2. IMPACT

2.1 Market

Users

As a result of preliminary studies, our final users will be private homes. More specifically, there will be the ones specified above, that are situated at Mediterranean climates, because they need heating about 4 months a year. Another characteristic is that they will have 2 or more bedrooms, because they will be benefited by the intelligent on-off programming of the several installed equipments, reducing the need of installed power in the household. They will want the dielectric-heater because it will reduce the electric bill due to heating by a 70% of the current one and want to invest in quality of live as long as the return of the investment will be up to 2 years and they have the money needed for the initial investment.

The most usual kind of final users are expected to be in the age segment 25-40 years mainly young families which have, or want to have 2 or more children. Another characteristic is that they are worried about the environment and are not afraid of being innovative, of breaking the standards (this will be checked in Evaluation of Social and Environmental impact: A3). Their income could be average (or low if they want to save money in the long term) and even if it's high, some extras can be made to the product like giving it a personalized design that hides the heater as it was a picture or a printed photograph. For the highest range, the integration of decorative 3D structures printed in ceramic or metal is also contemplated which, in addition to their aesthetic function, magnify the heat transfer to the air in the room. For the development of this specific part, negotiations are under way with Juan Besari Jiménez, who is an expert in 3D printing of metal and composite materials.

Market analysis

It is a high volume market, at the Mediterranean coast there is about 28 million household that are potential customers and it is mature because it already exists, houses have been heated for a long time. The size of the market in the whole Mediterranean area, as it is said before, is 28 million households that are potential customers, which in economic terms is translated into 1200 million euros in value. According to the European Commission⁵, around a 19% of these households are heated by electric heaters, versus which dielectric heater has more advantages.

A very interesting way of classifying the interest of the potential customers is taking into account the size of the houses. The bigger houses are, the more dielectric heaters will be needed and bigger the energetic saving will be. Frequently bigger houses are at small towns and villages, while at cities, smaller houses are usual.

To research about the market and the worries of the potential users, some companies with that expertise will be compared, for the moment we have contacted "Boutique de Conocimiento", a company specialised in market research which has a huge experience in making feasibility studies, making inquiries and tests but more companies will be contacted and the best in prize and capability will be selected

⁵[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Private_households_by_household_composition_2006-2015_\(number_of_households_in_1_000_and_%25_of_household_types\)_new.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Private_households_by_household_composition_2006-2015_(number_of_households_in_1_000_and_%25_of_household_types)_new.png)

Barriers

The main barrier to entry to household heaters market is that it is a well established market and the new companies have to bring some kind of added value in order to earn a portion of the market share. All the supply chain is well established. Microbiotech aims to reach an agreement of distribution with a well established seller, which would overcome this barrier with guarantees.

The initial price also can be considered as a barrier, a research has to be made in order to find out if the users are willing to pay more at the beginning and save more at the long term and know which groups of users will be more and which less affected by this barrier and make decisions in consequence. Also, the prize will become lower and lower while the innovation is being improved and the needed components become mainstream (as said in section 1.2 figure 5 of the S'DH amplifiers). Another strategy to surpass this barrier could be to finance the payment and do it in convenient terms or researching for public funding to actions to reduce the energy bill. One of the most important barriers to entry is that it exists a lack of confidence of the great public to the microwave technology. There are some beliefs that it is not safe, and it is harmful for the users, even when its safety has been scientifically proven. Marketing actions should be done to overcome this barrier. These actions have to be studied in the feasibility plan.

Competitors

Competitor	Why they are good?	Why are we better?
Klindo	Produces a wide variety of domestic heaters (oil, electrics and ceramics) that are cheap	In terms of lifetime, efficiency and heating quality
Orbegozo	They offer one of the current most efficient electric heaters in the market	Our efficiency will be even better, and we also improve in lifetime.
Astan Hogar	Specialized in portable electric heaters	Lifetime and energy consumption
Taurus	Specialized in portable oil heaters	Initial prize and lifetime
Jocel	Gas-oil heaters: Long lifespan and low consumption	We are safer and lower initial investment while similar consumption.
Equation	Ceramic and pellets heaters: high energy efficiency, long lifespan and good maintaining service	Lower initial investment and lower consumption.
Bluesky	Cheap small gas and electric heaters	In terms of lifetime, efficiency and heating rate.

A more accurate study has to be made in order to increase our knowledge of the market. This will be included in the feasibility study, in which several companies with that expertise will be compared, although we have already contacted with "Boutique de Conocimiento", a specialised company in market research that has already worked for Microbiotech. That knowledge will give Microbiotech a better understanding on where the market share is and where to focus their efforts to increase their sells and focus in the final users.

2.2 Business model

Alignment with overall strategy

This innovation fits with the company's strategy because Microbiotech is specialized in designing and selling innovative microwave industrial equipment. Until now the main activity is to develop Taylor made B2B equipments for laboratories or companies (such as grupo SIRO or Grupo Gimeno). Microbiotech carries out the tasks of R&D, design of the equipments, performs quality control and after-sales service. Manufacturing tasks are subcontracted to a specialized workshop, Sistemas RBT, a Valencian company experienced in automatized equipment manufacturing. The dielectric heater will be the first equipment designed by Microbiotech which will be directed to the public and has to be produced massively. So, this project is a good opportunity for Microbiotech to acquire manufacturing capacity and expand ur markets. In a first stage, with the help of the requested funding, a person will be sought for the staff with experience in the manufacturing industry to be responsible for production, warranty, legal framework. Parts of the production will also be subcontracted (at the beginning, Microbiotech will only do the tasks of integration, programming of systems, quality control and guarantee), and progressively Microbiotech will undertake all tasks.

Supply chain

With regard to the supply chain, to produce the dielectric heater 2 very specific inputs are necessary. The first one that is needed is a specific technical ceramic material with susceptor particles integrated, that are particles that absorb microwave energy very well, heating them very fast, which is provided by VICAR. VICAR, S.A is a company located in Manises (Valencia), founded in 1972 as a result of the union of 2 family businesses, dedicated to the preparation of pastes, ceramic compositions and the treatment of raw materials. It specializes in the technical ceramics sector, where it offers atomized or plastic mass compositions ready to be extruded, pressed or worked by casting. Some of these products are soapstone, porcelain or cordierite.

The second one is a solid-state amplifier which is provided by Ampleon a company dedicated to sell solid state amplifiers. It has agreements with some manufacturing companies that implement their amplifiers in turnkey equipment and with distributors that can sell that equipment or household appliances all around Europe Ampleon is also founding

member of the RF Alliance, which will provide us some contacts of providers and distributors. Ampleon and Microbiotech have applied together to a H2020 project, which proves the collaboration between them.

Microbiotech has collaboration agreements with both (Vicar and Ampleon). Some other electronic components that can be found in generic providers are necessary. To produce the first equipments, Microbiotech will make the design and SaveHeat will build it and reach the agreements in order to arrive to bigger and further markets.

Once it has been assembled, the key customer will be, at first, particular houses, through architecture studios or interior designer (figure 7A), and later big electro domestic store chain which is currently being sought, who will distribute and sell the dielectric heaters to the general users, first in a located area and then to the whole Mediterranean area (Figure 7B). Part of the work to be done with the funds that are requested are the search for distributors in Europe. It will start looking at the companies that belong to the RF Alliance because they are not unrelated or reticent to this technology Microbiotech's business model is the one showed in figure 7.

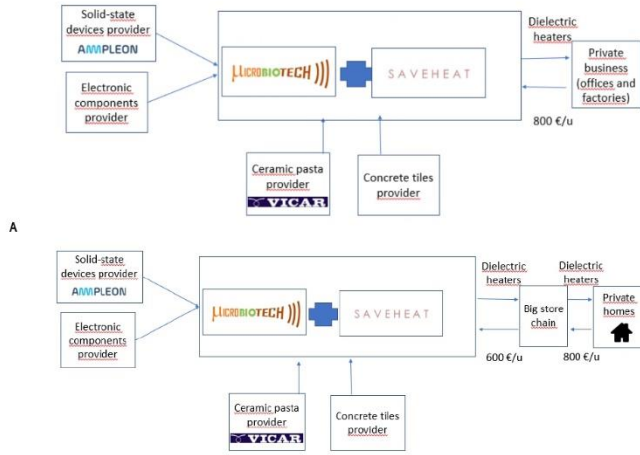


Figure 7. A Business model of Microbiotech for the beachhead market. B Business model of Microbiotech for the massive markets

Commercialization

On a first stage, Microbiotech, together with our partner-direct seller SavheHeat, has planned to sell dielectric heaters through prescriptors that will be architects studios or interior designers. This will make the sells increase to be progressive and will allow Microbiotech and SaveHeat to increase their manufacturing capacity in accordance.

Once the capacity of Microbiotech has grown significantly, it will be the moment to make an agreement with a big supply chain, like Miele, with whom the sales will be dramatically increased and will act as a distributor. That distributor will give the dielectric heater a European dimension and will make it able to reach new markets and new horizons thanks to its efficiency cited above. That store chain will take a percentage to be negotiated, which will be based on the final cost of production (which has to be specified by the feasibility plan). Microbiotech will provide technical assistance and reparations inside the warranty service when needed.

Our model is scalable because the dielectric heaters can be produced massively if the correct providers are held. The know-how of Microbiotech is necessary but once the dielectric heaters are manufactured, they can be distributed all around the Mediterranean area and benefit for the scale economy. In the first phase, all will be integrated in Microbiotech, but the analysis of the feasibility and planning the manufacturing process (C1) should clarify if, when the European expansion is made, is more profitable to centralize the whole production or to develop factories in the targeted countries.

2.3 Financing

Current Investment

The company has 5 owners, first, Ruth De los Reyes and David De los Reyes, who have 41 % of the shares each, and then Elias De los Reyes, Enrique Vela and Juan Eduardo Santón who have 18% of the company each. Apart to the initial investment, 215.000 € have been invested (tangible and intangible assets)

Stage	Investment required (€)	Job creation	Sales	Income/year (€)	Margin (%)
First stage	316.000	4-6	400	350.000	30
Second stage	1.880.000	20-25	3000	2.400.000	35

Margin and jobs creation

The expected margin is possible because Dielectric Heater has a return of the investment of less than 2 years. It has been considered the costs of producing the equipment and the expected selling price (it has to be specified, but it will be close to 800-900 €).

New hires will be made when the product is validated at real environment, because the producing capacity of SaveHeat will require workers, engineers and experts in logistics. Indirectly, it will also need marketing experts in order to communicate to the end-user the benefits of this new heating device. These hires will be increased in the second phase with massive production capacity. At this stage, it will not be possible to achieve the whole fabrication process, so some other companies should be subcontracted and an integration task will be done.

Investment required

To reach the commercialization stage of dielectric heater, two stages are required. The first one is to bring the equipment from laboratory scale to real scale. The funds will be needed for the equipment (98.000 €), the staff (105.000 €), the outsourcing (45.000 €) and other costs (73.000).

The second stage, which will need a bigger amount of funds, will be the acquisition of mass production capacity. More employees should be contracted in this stage (850.000 € aprox), machinery in order to establish the production process has to be bought (500.000 € aprox) and some other raw materials and basics (230.000), adding to some other operational, direct and indirect costs (200.000 €).

The required investment is thought to be in part assumed by the company, thanks to the revenues from the first sales and from technical support and assessment in microwaves equipments that are being sold. Funding coming from investors will also be requested. The company has the training to find investors given by the accelerator of start-ups EIT-Climate KIC in its phase 3, reached in 2016, and SaveHeat is now on the same accelerator, so the capacity to make business plans and to convince them to invest in the company is acquired. If a phase 2 of a SME instrument is conceded, this process will be much faster.

Incomes

According to the preliminary studies, when the massive production capacity is achieved, it is expected to raise 2.4 million euros of turnover because it will be distributed by all the Mediterranean area. It will start being sold in the Mediterranean coast of Spain, then, during the second year, the adjacent countries Portugal and France will be targeted. At some point in the third year, having a base in three countries with a big market, the expansion to the whole Mediterranean region will be made, thanks to the international providers sought in the RF Alliance, so the potential benefits will be increased.

Break-even

One of the objectives (C1) of the phase 1 is to carry out a financial analysis that confirms the return on investment and accurately calculates the break-even point and conducts a study on the profitability and sensitivity of the investment (cash-flows, break-even and ROI).

2.4 Intellectual Property Right (IPR) and legal framework

Microbiotech S.L. has the technology of bringing microwave energy outside of the cavity patented in Spain (ES2568749) and the European patent has been applied (EP 15846187.1, N/Ref.:EP1641.995). That makes impossible for the competitors to copy this technology. Furthermore, the design of the radiant wall has been protected by our partner SaveHeat, with the Utility Model ES 1176712 U, and its aiming to extent the protection to the whole Europe, making it impossible to be copied.

The interdisciplinary team of Microbiotech has the key knowledge to produce and to fit in every necessary asset to bring this innovation to the market. Consistent with that, the company protects its innovations with patents and utility models when it is possible. Up to now, it only has a patent but is currently in process of requesting a utility model in other project, which proves the innovative capacity of the company. Also, confidentiality agreements are signed with any partner that collaborates with the company, by being a big scale seller, a provider for some component of the equipment

or an industrial producer. Microbiotech also has agreements with UPV to manage the knowledge and to externalize some R+D tasks that require more complex laboratory equipment.

Some part of the market study that will be made to accomplish the phase 1 of H2020 SMEs Instrument is a research about legal and regulatory requirements to be fulfilled in different countries of the Mediterranean region (B1). Currently, very few information has been obtained by Microbiotech and expertise in laws could be required. In order to ensure commercial exploitation and the final sellers to have freedom to operate, Microbiotech will sign confidentiality and operative agreements in order to preserve the know-how but to make concrete conditions in which Microbiotech's product can be sold without compromising any of the company's interests. Similar company names have been found in Europe, but for other sector that do not compromise the rights or the operative of the company.

3. IMPLEMENTATION

3.1 Team



Ruth De los Reyes has knowledge of resources and team management acquired by the experience of being CEO of Microbiotech last 4 years and as projects manager in ITACA Research Centre 3 years before. She will coordinate the R&D tasks attending to her know-how in thermodynamic processes.

David De los Reyes has knowledge of how to manage and organize production processes, with the important tool to control processes SAP. He also contributes in the management of our financial issues.

Elías De los Reyes is the responsible of the know-how to bring the microwave energy outside of the cavity. He has high knowledge and experience in electronics, radar and its components. He has brought to Microbiotech contacts of the solid-state providers and some microwave manufacturers all around the world.

Juan Eduardo Santón has knowledge and experience in business management. He will manage the organization of the company and will design the ultimate business scheme.

Enrique Vela is the responsible of the production and control of the ceramic part of the equipment, also participating in R&D tasks.

Carlos Coquillat has experience of industrializing and improving process in different companies from several industrial sectors. He will also approach the product to the market with the first sales of it.

The capacities that Microbiotech has to acquire are knowledge and capacity to deal with legal issues and international business experience. For the former, Jose Vicente Ros Lis (experienced in projects managements and legality) is currently working in the company by a part-time contract, combining it with the university, and Microbiotech has the intention to sign him for full time in the future. And to the second (international business), a new employee has to be signed, Microbiotech is looking in the contacts given by the accelerator Climate KIC and also, Pablo Santón and Diego Alcañiz, employees of the company (electronics and thermodynamics experienced each), are being trained.

3.2 Work plan – Work package and deliverable

Work Package Title	Feasibility Study
Objectives	A1. Market analysis and market strategy.
Feasibility Study Objectives	A2. Assessment of partnerships and strategic alliances.
	A3. Evaluation of Social and Environmental impact.
	A4. Marketing Strategy and competitive analysis.
	B1. Analysis legal and political framework, IPR/patents and risks
	C1. Analysis of the feasibility and planning the manufacturing process
	C2. Commercial analysis, financial planning and financial strategy
	D1. A feasibility study report and Business Plan based on study results
A1. Market analysis and market strategy: Cost: 2,053 € / Duration: 3 months	
Identify and confirm priority markets, market accessibility and phased growth and expansion plan. Conduct advisory boards and surveys with customers and identified partners to obtain feedback.	
A2. Assessment of partnerships and strategic alliances: Cost: 12,100 € / Duration: 2.5 months	
Assess roadmap for developing alliances and partnerships for commercial, logistical and financial relationships. The search will be started by the members of the RF Alliance. Produce, report and plan for partner engagement. Devise a Partner Advisory Board and obtain formal feedback	
Devise a list of strategic commercial partners - identify and prioritize members of the RF Alliance. Identify key technology partners (Ampleon, Vicar, if necessary the subcontract of other components...). Attend programmes and	

events related to identifying strategic financial partners.
 Attend key waste events and promote strategic and tactical relationships. Assess possible consortia partners
A3. Evaluation of Social and Environmental impact: *Cost: 4,650 € / Duration: 1.5 month*
 Evaluate environmental impact of project, lifecycle assessment to identify key areas of impact (including ecological footprint analysis). Assess extent of circular economy implementation considering constraints and future possibilities. Learn if this, as an advantage, can be a key buying-reason for the "type customer."
 Evaluate the social impact and produce a report, with empirical evidence and quantitative surveys to evaluate. Search for probability of obtain public support/grant for the initial investment: report
A4. Marketing Strategy and competitive analysis: *Cost: 10,445 € / Duration: 2 months*
 Analysis of the competitive environment and key players. Assess requirements for developing a Competitor Watch
 Identification of key barriers and opportunities in the market - SWOT analysis.
 Define a high-level sales and marketing strategy.
 Define a customer engagement plan to maximise positive customer and user experience.
B1. Analysis legal and political framework, IPR/patents and risks: *Cost: 9,916 € / Duration: 2 months*
 Conduct a one-off worldwide technology watch analysis (with view of establishing an ongoing service throughout the lifecycle of the product). Assess strategy and requirements to maintain patents.
 Assess potential technological competitors and threats in the market - feed in results into the SWOT analysis.
 Assess regulatory requirements and impact on national and EU levels.
 Evaluate requirements and plan for political and advocacy campaigns.
 Deliver a risk assessment report and a risk matrix; consider technological, market and regulatory risks.
C1. Analysis of the feasibility and planning the manufacturing process *Cost: 7,796 €/Duration: 2months*
 Feed in results from market and partner surveys to feed into the process development roadmap.
 Devise an operational plan in line with the market expansion strategy, considering scalability and constraints
 Identify requirements for capacity building in all operational areas, including human resources and training.
C2. Commercial analysis, financial planning and financial strategy: *Cost: 6,466 € / Duration: 2 months*
 Provide an analysis on the commercial viability of the product, per unit analysis (cost, price and margins), and the overall viability of the project (cash-flows, break-even and ROI) - for a 3-year plan. Develop various commercial offerings to suit identified target markets.
 Assess the financial strategy and make assumptions on capital investments to facilitate the growth and expansion plan, in line with the market strategy.
D1. Develop a feasibility study report and Business Plan based on study results *Cost: 1,600 € / Duration: 0.8 months*
 Synthesise the results of the feasibility study into a formal business plan. Provide a summary competition matrix, SWOT analysis and risks matrix.
Deliverable 1: Feasibility assessment report (20 pages) based on study results, considering various scenarios and a 'go, no-go' decision for each market (month 6). **Deliverable 2: Business Plan** with an international perspective based on results of the feasibility study (month 6).

3.3 Resources

Form of costs				
Costs of the feasibility study/Direct and indirect costs of the action	Total costs	Reimbursement rate %	Maximum EU contribution	Maximum grant amount
Lump sum				
50 000	71 429	70 %	50 000	50 000

SELLO DE EXCELENCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACION

